



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Химико-  
технологический  
институт**

**М. А. МИРОНОВ**

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В БИОТЕХНОЛОГИИ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Учебно-методическое пособие**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

М. А. Миронов

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В БИОТЕХНОЛОГИИ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
в качестве учебно-методического пособия для студентов вуза,  
обучающихся по направлению подготовки  
19.04.01 «Биотехнология»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2018

УДК 606(07)  
М641

**Р е ц е н з е н т ы:**

научно-технический совет ООО «НПО БиоМикрогели»  
(генеральный директор кандидат технических наук А. А. Елагин);

С. А. Романова, кандидат химических наук,  
региональный представитель ООО «Берингер Ингельхайм»

**Миронов, М. А.**

**М641** Материаловедение в биотехнологии и пищевой промышленности : учеб.-метод. пособие / М. А. Миронов ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 86 с.

ISBN 978-5-7996-2427-9

Учебно-методическое пособие включает теоретические разделы курса «Проектирование биотехнологических производств» о выборе материалов для биотехнологии, а также справочные данные о свойствах различных материалов. Пособие разделено на разделы, посвященные физическим, химическим и механическим свойствам материалов, а также критериям подбора материалов в биотехнологии. Приводятся классификация материалов, справочные таблицы, данные о коррозионной стойкости материалов и методы проведения механических испытаний.

Адресовано студентам всех форм обучения. Может быть использовано для подготовки к практическим занятиям, а также для выполнения курсового проекта и сдачи зачета или экзамена по дисциплине «Проектирование биотехнологических производств».

УДК 606(07)

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| Предисловие .....  | 4         |
| <b>1. Общая классификация материалов,<br/>применяемых в биотехнологических производствах .....</b> | <b>5</b>  |
| 1.1. Металлические материалы .....   | 6         |
| 1.2. Керамические материалы .....  | 7         |
| 1.3. Полимерные материалы .....  | 9         |
| 1.4. Композитные материалы .....   | 11        |
| <b>2. Физические свойства материалов .....</b>   | <b>13</b> |
| 2.1. Температуры фазовой трансформации .....   | 13        |
| 2.2. Удельная плотность .....  | 21        |
| 2.3. Теплопроводность .....  | 26        |
| 2.4. Линейный коэффициент теплового расширения .....   | 34        |
| 2.5. Электрическая проводимость .....  | 37        |
| <b>3. Химические свойства материалов.<br/>Устойчивость к коррозии .....</b>                        | <b>41</b> |
| <b>4. Механические свойства материалов .....</b>   | <b>51</b> |
| 4.1. Механические свойства материалов под действием нагрузки .....                                 | 52        |
| 4.2. Ударная прочность материалов .....  | 66        |
| 4.3. Твердость материалов .....  | 68        |
| <b>5. Особенности выбора материалов в биотехнологии .....</b>                                      | <b>77</b> |
| Список рекомендуемой литературы .....  | 84        |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Материаловедение – необходимая база для успешного обучения инженерным специальностям. Правильный выбор материалов обязателен при выполнении курсовых работ и подготовке магистерской диссертации. При этом следует иметь в виду, что биотехнологическая промышленность предъявляет особые требования к материалам для изготовления биореакторов, массо- и теплообменного оборудования, поскольку оно используется при выпуске пищевых продуктов и биологически активных соединений.

Материаловедение подробно рассматривается в нескольких учебных курсах при обучении студентов специальности «Биотехнология» на стадии бакалавриата. Однако в магистратуре по специальности «Биотехнология» проходят обучение студенты других естественно-научных специальностей, у которых в программе обучения на стадии бакалавриата отсутствовали дисциплины, связанные с выбором материалов в промышленности. Поэтому они должны восполнить эти знания в ходе самостоятельной работы. Кроме того, при подготовке курсового проекта по модулю «Моделирование биотехнологических процессов» студентам необходимы справочные данные для проведения расчетов.

Данное учебное пособие позволяет решить эти задачи; основы материаловедения приводятся здесь в максимально доступной форме с дополнением в виде справочных таблиц по основным свойствам материалов. При обучении в магистратуре знания должны быть закреплены и дополнены методами проектирования технологического оборудования.

Пособие может быть использовано при подготовке курсового проекта по модулю и магистерской диссертации, а также для практических занятий с преподавателем.

# 1. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

В данном параграфе приведена краткая характеристика четырех основных классов технических материалов. Кроме того, рассмотрена структура материалов на атомном уровне, так как именно особенности электронных уровней атома придают материалам их характерные свойства. Также будут рассмотрены некоторые из свойств, которые важны для структурных характеристик материала, и методы, применяемые для модификации этих свойств.

Существуют тысячи материалов, доступных для использования в инженерных приложениях. Большинство из них относятся к одному из трех классов, которые значительно отличаются друг от друга по характеру сил атомного связывания в материале: металлические материалы, керамические и полимерные. Кроме того, различные материалы могут быть объединены для создания композитных материалов, которые выделяются в отдельный, четвертый класс. В рамках каждого из этих классов материалы дополнительно группируются на основе их химического состава или определенных физических или механических свойств. Композитные материалы часто группируются по типам или способу их изготовления. Ниже приведена общепринятая классификация материалов в рамках этих четырех общих классов:

| Металлы  | Полимеры  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Черные металлы и сплавы (сталь, чугун, ферросплавы)</li><li>• Цветные металлы и их сплавы (алюминий, медь, титан и т. д.)</li><li>• Редкие металлы</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Термопласты</li><li>• Реактопласты</li><li>• Эластомеры</li></ul> |

| Керамика   | Композиты  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Стекло</li> <li>• Фарфор</li> <li>• Техническая керамика</li> <li>• Графит</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Армированные пластмассы</li> <li>• Металлокомпозиты</li> <li>• Керамокомпозиты</li> </ul> |

Каждая из этих общих групп далее будет рассмотрена более подробно.

## 1.1. Металлические материалы

На металлы приходится около двух третей всех элементов и около 24 % массы планеты. Металлы обладают многими полезными свойствами, включая прочность, пластичность, высокие температуры плавления, тепловую и электрическую проводимость и вязкость. Из периодической таблицы видно, что большое количество элементов классифицируются как металлы. Ниже приведены примеры наиболее широко используемых металлов и краткий обзор их свойств.

Общие металлические материалы:

- железо/сталь – сплавы на основе железа (стали), используются в качестве основного конструкционного материала в промышленности;

- алюминий – алюминий и его сплавы, легко формуются, имеют низкую плотность, относительно недороги и пригодны для повторного использования;

- медь – медь и медные сплавы, обладают рядом свойств, которые делают их незаменимыми в биотехнологической промышленности, включая высокую электрическую и теплопроводность, высокую пластичность и хорошую коррозионную стойкость;

- титан – титановые сплавы, используются для прочности при более высоких температурах (~ 500 °C), когда удельная плотность компонента является важным критерием или когда требуется хорошая коррозионная стойкость;



- никель – никелевые сплавы, используются для еще более высоких температур ( $\sim 800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) или когда требуется хорошая коррозионная стойкость;
- редкие металлы – ниобий, тантал и сплавы на их основе, используются для работы при высоких температурах ( $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Ключевой особенностью, которая отличает металлы от металлов, является их электронное строение. Металлические материалы имеют свободные электроны, которые могут свободно перемещаться от одного атома к другому. Существование этих свободных электронов влечет ряд глубоких последствий для свойств металлических материалов. Например, металлические материалы способны быть хорошими электрическими проводниками, потому что свободные электроны могут легко перемещаться внутри металла. Наличие свободных электронов предопределяет и такие свойства металлов, как высокая теплопроводность и механическая пластичность. Конкретные свойства металлов будут более подробно рассмотрены в соответствующих параграфах.

## 1.2. Керамические материалы

Керамика традиционно определяется как неорганическое, неметаллическое твердое вещество, которое получено из порошкообразных материалов, сформировано в продукты посредством применения высоких температур и характеризуется такими свойствами, как твердость, прочность, низкая электропроводность и хрупкость. Слово «керамика» происходит от греч. «керамикос» – глина. Керамические материалы обычно являются кристаллическими по своей природе и представляют собой соединения, образованные между металлическими и неметаллическими элементами, такими как алюминий и кислород (оксид алюминия,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), кальций и кислород (оксид кальция,  $\text{CaO}$ ), кремний и азот (нитрид кремния,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

В зависимости от способа получения керамика может быть плотной или легкой. Как правило, керамические материалы демонстрируют отличную прочность и твердость, однако они обычно хрупки по своей природе. В зависимости от способа формирования

различные виды керамики могут быть использованы в качестве изоляторов, а также электропроводящих материалов. Некоторые виды керамики, например сверхпроводники, также обладают магнитными свойствами. Керамика более устойчива к высоким температурам и суровым условиям окружающей среды, чем металлы и полимеры.

Благодаря широкому спектру свойств керамические материалы используются во многих областях. Основные типы материалов, которые производит керамическая промышленность:

- изделия из строительной глины (кирпич, канализационные трубы, кровельные и настенные плитки, дымовые прокладки);
- фаянс и фарфор (посуда, напольная и настенная плитка, электрический фарфор);
- огнеупорные материалы (кирпич и монолитные продукты, используемые в металлургии, стекольной, нефтяной и химической промышленности);
- стекло и стекловолокно (оконное стекло, стеклянная посуда, оптическое стекло, специальные виды стекол, стекловата, оптические волокна);
- абразивные материалы, натуральные (гранат, алмаз) и синтетические (карбид кремния, алмаз, плавленный глинозем). Абразивы используются для шлифовки, резки, полировки, притирки или обработки материалов под давлением;
- цементы (для строительства дорог, мостов, зданий, плотин);
- специальные виды керамики:
  - конструкционная керамика (изнашиваемые детали, биокерамика, режущий инструмент и компоненты двигателей);
  - электрическая керамика (конденсаторы, изоляторы, подложки, интегральные схемы, пьезоэлектрики, магниты и сверхпроводники);
  - керамические покрытия (компоненты двигателей, режущие инструменты и промышленные детали);
  - макро- и мезопористые материалы (химические фильтры, мембраны, катализаторы и подложки для катализаторов).

Атомы в керамических материалах удерживаются вместе комбинацией ковалентных и ионных связей. Ковалентные и ионные связи в керамике намного сильнее, чем связи в металлических материалах, именно поэтому керамика является хрупкой, а металлы пластичными. Отсутствие обобществленных электронов в большинстве типов керамических материалов приводит к их низкой электропроводности.

В биотехнологической промышленности керамические материалы широко используются в качестве конструкционного материала для изготовления реакторов малого объема, труб, смотровых окон, для нанесения покрытий (эмалированное оборудование) и производства фильтров для очистки воздуха и культуральных жидкостей.

### **1.3. Полимерные материалы**

Полимерное твердое вещество можно рассматривать как материал, который содержит большое количество химически связанных цепей или узлов, которые соединены между собой. «Полимер» – букв. «много частей», что говорит о наличии в его структуре повторяющихся элементов. Промышленно важными полимерными материалами являются пластмассы и эластомеры. Пластмассы представляют собой большую и разнообразную группу синтетических материалов, которые обрабатываются путем экструзии или формования. Так же как существуют различные типы металлов, таких как алюминий и медь, существует много видов пластмасс, таких как полиэтилен и нейлон. Полимерные пластмассы можно разделить на два класса – термопласты и реактопласты в зависимости от того, как они структурно и химически связаны. Термопластичные полимеры включают четыре наиболее важных товарных материала: полиэтилен, полипропилен, полистирол и поливинилхлорид, кроме того, существует ряд специализированных инженерных полимеров, таких как тетрафторполиэтилен. Термин «термопласт» указывает на то, что эти материалы плавятся при нагревании и могут обрабатываться различными способами формования и экструзии. В противоположность этим материалам «термореактивные» поли-

меры не могут быть расплавлены или переплавлены, так как образуют трехмерную сеть. Термореактивные полимеры включают алкидные смолы, amino- и фенольные смолы, эпоксидные смолы, полиуретаны и ненасыщенные полиэферы.

Эластомеры или каучуки отличаются тем, что могут быть упругодеформированы при приложении к ним силы и могут вернуться к их первоначальной форме при снятии нагрузки. Подобно реактопластам эластомеры имеют трехмерную структуру, в которой отдельные полимерные цепи соединены ковалентными мостиками. Однако в каучуках эти цепи свернуты в клубки, способные расправляться при приложении к материалу механической нагрузки.

Полимеры обладают многими свойствами, которые делают их привлекательными для использования в биотехнологической промышленности. Так, большинство полимеров имеют меньшую удельную плотность, чем металлы или керамика, они могут хорошо противостоять атмосферным и другим видам коррозии, обеспечивают хорошую совместимость с биологическими объектами и демонстрируют низкую проводимость электрического тока.

Полимерная молекула представляет собой длинную цепь ковалентно связанных атомов, а вторичные связи (ионные, водородные) затем удерживают группы полимерных цепей вместе, образуя полимерный материал. В промышленности до сих пор используют природные полимеры, такие как натуральный каучук, целлюлоза, гуммиарабик, различные камеди. Однако большинство полимеров получают с помощью органического синтеза путем разработки оптимальной комбинации атомов и взаимного расположения цепочек, которые они образуют. Эти полимеры в основном производятся из нефти или природного газа, но в последнее время растет использование возобновляемых органических веществ.

По своим механическим свойствам некоторые полимеры превосходят металлы. В качестве примера можно привести ариламидное волокно под торговой маркой «кевлар». Этот материал используется для армирования пуленепробиваемых жилетов, сильных/облегченных рам и подводных кабелей, которые в 20 раз прочнее стали.

## 1.4. Композитные материалы

Композит обычно определяется как комбинация двух или более отдельных материалов, каждая из которых сохраняет свои собственные отличительные свойства, чтобы создать новый материал со свойствами, которые не могут быть достигнуты с помощью только отдельных компонентов. Исходя из этого определения, в данную категорию можно включить широкий спектр технических материалов. Например, бетон – это композит, потому что он представляет собой смесь портландцемента и заполнителя. Стекловолокно также композит, поскольку изготовлено из стекловолокна, вложенного в полимер.

Отмечается, что составные композитные материалы имеют две фазы. Армирующая фаза представляет собой волокна, листы или частицы, которые встроены в матричную фазу. Усиливающий материал и материал матрицы могут быть металлическими, керамическими или полимерными. Как правило, упрочняющие материалы являются прочными веществами с низкой плотностью, в то время как матрица – обычно пластичный или жесткий материал.

Общая классификация композитов:

- армированные пластмассы;
- металломатричные композиты;
- керамические матричные композиты;
- сэндвич-структуры;
- наполненные структуры (такие как бетон).

Композиционные материалы могут принимать разные формы, но на основе применяемой технологии укрепления их можно разделить на три категории:

- усиленные дисперсией;
- усиленные частицами;
- армированные волокнами.

Дисперсионные упрочненные композиты имеют в своем составе мелкие частицы, равномерно распределенные в матрице материала. Эти частицы препятствуют механизмам, позволяющим деформировать материал, например, перемещению дислокаций и скольжению. Многие материалы с металлической матрицей попадают в ка-

тегорию композитов, упрочненных дисперсией. Композиты, усиленные частицами, имеют большую объемную долю достаточно крупных (до нескольких миллиметров) включений другой фазы, диспергированных в матрице, поэтому механическая нагрузка разделяется между частицами и матрицей. Большинство коммерческих керамических материалов и множество наполненных полимеров являются композициями, армированными частицами. В волокнистых композитах волокно является основным несущим компонентом. Композиции из стекловолокна и углеродного волокна – примеры армированных волокном композитов.

Если композит спроектирован и изготовлен правильно, он сочетает в себе прочность арматуры с вязкостью матрицы для достижения комбинации желаемых свойств, недоступных ни в одном обычном материале. Некоторые композиты имеют преимущество: они могут быть адаптированы к конкретному применению таким образом, что свойства, такие как прочность и жесткость, могут быть легко изменены путем изменения количества или ориентации армирующего материала.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Физические свойства – это свойства, которые могут наблюдаться без изменения химического состава вещества. Примерами физических свойств являются общие свойства вещества, такие как цвет, плотность, твердость. В то же время свойства, характеризующие изменение вещества в другое по химическому составу, называются химическими свойствами. Воспламеняемость и стойкость к коррозии/окислению – примеры химических свойств.

Различие между физическими и химическими свойствами является простым до тех пор, пока не будет рассмотрена фаза материала. Когда материал изменяется от твердого тела к жидкости до пара, кажется, что образуются разные вещества. Однако когда материал плавится, затвердевает, испаряется, конденсируется или возгоняется, изменяется только состояние вещества. Рассмотрим лед, жидкую воду и водяной пар, все они представляют собой простое вещество состава  $H_2O$ . Фаза – это физическое свойство материи, и материя может существовать в четырех фазах: твердой, жидкой, газовой и в фазе плазмы.

Некоторые из наиболее важных физических свойств с точки зрения инженерного материаловедения будут обсуждаться в следующих параграфах.

### 2.1. Температуры фазовой трансформации

Когда температура поднимается, а давление поддерживается постоянным, типичное вещество изменяется от твердого состояния к жидкости, а затем переходит в пар. Переходы от твердого тела к жидкости, от жидкости к парам, от пара к твердому состоянию и наоборот называются фазовыми превращениями или переходами. Так как некоторые вещества имеют несколько кристаллических форм, широко распространены случаи перехода из одной твердой

фазы в другую. Подобные трансформации очень важны для получения материалов с заданными свойствами, типичным примером может служить закалка стали.

При фазовых переходах от твердого тела к жидкости, а от жидкости к пару происходит поглощение тепла. Температура фазового перехода, когда твердое вещество переходит в жидкость, называется точкой плавления. Температура, при которой давление паров жидкости равно 1 атм (101,3 кПа), называется температурой кипения. Некоторые материалы, такие как термопласты и стекло, не переходят просто из твердого вещества в жидкость с повышением температуры. Вместо этого при некоторой температуре ниже точки плавления они начинают терять свою упорядоченную структуру, но молекулы остаются связанными в цепях, что приводит к размягчению материала. Температура, при которой твердый стеклянный материал начинает размягчаться и приобретает текучесть, называется температурой размягчения. Обратный процесс застывания материала характеризуется температурой стеклования.

В табл. 2.1 приведены температуры плавления и кипения низкоплавких металлов ( $< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), наиболее широко применяемых в технике.

Т а б л и ц а 2.1

**Температуры плавления и кипения низкоплавких металлов**

| Элемент | Латинское обозначение | Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$ | Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$ |
|---------|-----------------------|---|---|
| Ртуть   | Hg                    | -38,9                                     | 356,73                                  |
| Цезий   | Cs                    | 28,4                                      | 667,5                                   |
| Галлий  | Ga                    | 29,76                                     | 2204                                    |
| Калий   | K                     | 63,6                                      | 759                                     |
| Натрий  | Na                    | 97,8                                      | 883                                     |
| Индий   | In                    | 156,6                                     | 2072                                    |
| Литий   | Li                    | 180,5                                     | 1342                                    |



О к о н ч а н и е   т а б л . 2.1

| Элемент | Латинское обозначение | Температура плавления, °С | Температура кипения, °С |
|---------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Олово   | Sn                    | 232                       | 2600                    |
| Висмут  | Bi                    | 271,4                     | 1564                    |
| Кадмий  | Cd                    | 321,1                     | 767                     |
| Свинец  | Pb                    | 327                       | 1750                    |
| Цинк    | Zn                    | 420                       | 907                     |

В табл. 2.2 приведены температуры плавления и кипения тугоплавких металлов, а в табл. 2.3 – остальных металлов. Ориентировочные температуры плавления сплавов даны в табл. 2.4.

Т а б л и ц а   2.2

### Температуры плавления и кипения тугоплавких металлов

| Элемент  | Латинское обозначение | Температура плавления, °С | Температура кипения, °С |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Вольфрам | W                     | 3420                      | 5555                    |
| Рений    | Re                    | 3186                      | 5596                    |
| Осмий    | Os                    | 3054                      | 5012                    |
| Тантал   | Ta                    | 3017                      | 5458                    |
| Молибден | Mo                    | 2623                      | 4639                    |
| Ниобий   | Nb                    | 2477                      | 4744                    |
| Иридий   | Ir                    | 2447                      | 4428                    |
| Рутений  | Ru                    | 2334                      | 4150                    |
| Гафний   | Hf                    | 2233                      | 4603                    |

Т а б л и ц а 2.3

**Температуры плавления и кипения металлов,  
плавящихся в среднем диапазоне температур**

| Элемент  | Латинское обозначение | Температура плавления, °С | Температура кипения, °С |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Сурьма   | Sb                    | 630,6                     | 1587                    |
| Магний   | Mg                    | 651                       | 1100                    |
| Алюминий | Al                    | 660                       | 2519                    |
| Барий    | Ba                    | 727                       | 1897                    |
| Кальций  | Ca                    | 842                       | 1484                    |
| Серебро  | Ag                    | 960                       | 2180                    |
| Золото   | Au                    | 1063                      | 2660                    |
| Медь     | Cu                    | 1083                      | 2580                    |
| Марганец | Mn                    | 1246                      | 2061                    |
| Бериллий | Be                    | 1278                      | 2471                    |
| Никель   | Ni                    | 1455                      | 2913                    |
| Кобальт  | Co                    | 1495                      | 2927                    |
| Железо   | Fe                    | 1539                      | 2900                    |
| Титан    | Ti                    | 1660±20                   | 3300                    |
| Платина  | Pt                    | 1769,3                    | 3825                    |
| Цирконий | Zr                    | 1855                      | 4409                    |
| Хром     | Cr                    | 1907                      | 2671                    |
| Ванадий  | V                     | 1910                      | 3407                    |

В отличие от металлов керамические материалы не имеют определенной температуры плавления. Для оценки возможности их применения при различных температурных диапазонах используют понятие термостойкости, т. е. температуры, при которой воз-

Т а б л и ц а 2.4

## Температуры плавления сплавов

| Сплав       | Состав  | Диапазон температур плавления, °С |
|-------------|---|-----------------------------------|
| Константан  | Медь, никель, марганец                                    | 1260                              |
| Дюралюминий | Алюминий, магний, медь, марганец                          | 640–660                           |
| Инвар       | Никель, железо  | 1425                              |
| Латунь      | Медь, цинк  | 880–950                           |
| Мельхиор    | Медь, никель  | 1150–1170                         |
| Нейзильбер  | Медь, цинк, никель  | 1050–1100                         |
| Бронза      | Медь, олово   | 930–1140                          |
| Нихром      | Никель, хром, добавки кремния, железа, марганца, алюминия | ~ 1400                            |
| Сталь       | Железо, углерод   | 1300–1500                         |
| Фехраль     | Хром, железо, алюминий, марганец, кремний                 | ~ 1450                            |
| Чугун       | Железо, углерод   | 1100–1300                         |

можно практическое использование данного материала. Термостойкость неглазурованного фарфора составляет 1400–1500 °С. Глазурованный фарфор менее термостоек, так как вследствие легкоплавкости глазури его можно применять лишь до 1200 °С. При продолжительном нагревании такого фарфора уже при температуре около 1000 °С глазурь растрескивается и отслаивается.

Шамот – керамический материал серовато-коричневого цвета, термостойкий до 1300–1400 °С. Если к шамоту добавить кварцевый песок, получается кварцевый шамот, выдерживающий температуру до 1500 °С. Динас – серовато-коричневый керамический материал, размягчающийся при 1350 °С и плавящийся при температуре выше 1650 °С.

В некоторых случаях используются чистые оксиды металлов, многие из которых являются тугоплавкими (табл. 2.5). Так, оксид кальция  $\text{CaO}$  получают в промышленном масштабе в объеме 109 млн т/год и используют для футеровки печей. В качестве огнеупоров используют также оксиды бериллия  $\text{BeO}$  и магния  $\text{MgO}$ . Периклазовая керамика из оксида магния – серая тугоплавкая твердая масса с температурой плавления, достигающей  $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такой керамикой футеруют высокотемпературные печи, работающие при температурах до  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Т а б л и ц а 2.5

**Температуры плавления оксидов металлов**

| Металл | Оксид                   | Цвет      | Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$ |
|--------|-------------------------|-----------|---|
| Mg     | $\text{MgO}$            | Белый     | 2850                                      |
| Ca     | $\text{CaO}$            | Белый     | 2614                                      |
| Be     | $\text{BeO}$            | Белый     | 2580                                      |
| Sc     | $\text{Sc}_2\text{O}_3$ | Белый     | 2450                                      |
| Sr     | $\text{SrO}$            | Белый     | 2430                                      |
| Al     | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | Белый     | 2050                                      |
| Zn     | $\text{ZnO}$            | Белый     | 1975                                      |
| Ba     | $\text{BaO}$            | Белый     | 1923                                      |
| Ti     | $\text{TiO}_2$          | Белый     | 1870                                      |
| Ga     | $\text{Ga}_2\text{O}_3$ | Желтый    | 1795                                      |
| Pb     | $\text{PbO}$            | Желтый    | 1580                                      |
| Cu     | $\text{Cu}_2\text{O}$   | Оранжевый | 1242                                      |

Корунд (алуид) – прозрачный твердый огнеупорный материал с температурой плавления  $2044\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Он состоит в основном из оксида алюминия, поэтому имеет определенную температуру плавления.

Керамика из диоксида циркония – белая или серая сплавленная масса, обладающая очень высокой прочностью, сохраняющейся до 1300–1500 °С.

Сверхогнеупорная керамика имеет температуру плавления не ниже 3000 °С. Ее ассортимент весьма ограничен. Такую керамику получают на основе карбидов и нитридов редких металлов, таких как гафний, тантал и цирконий (в скобках указана температура плавления, °С): смесь  $\text{HfC}_x$  с  $\text{TaC}_x$  в соотношении 1 : 4 по массе (4215),  $\text{HfC}_x$  (3900),  $\text{TaC}_x$  (3800),  $\text{HfNx}$  (3600),  $\text{ZrC}_x$  (3530),  $\text{NbC}_x$  (3500),  $\text{HfB}_2$  (3250),  $\text{TaNx}$  (3240),  $\text{ThO}_2$  (3200),  $\text{TiC}_x$  (3140),  $\text{TaB}_2$  (3100),  $\text{ZrB}_2$  (3040), боразон BN (3000). Из этого перечня только пять материалов ( $\text{ZrC}_x$ ,  $\text{TiC}_x$ , BN,  $\text{TaC}_x$  и  $\text{HfC}_x + \text{TaC}_x$ ) считают перспективными для более или менее широкого применения в промышленности.

Для оценки возможности эксплуатации изделий из стекла используется понятие «температура размягчения». При достижении этой температуры вязкость изделия снижается до значений, при которых стекло приобретает текучесть. Температура размягчения кварцевого стекла, при которой достигается динамическая вязкость  $10^7$  пуаз (пуаз =  $10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ), равна 1250 °С. При отсутствии значительных перепадов давления кварцевые изделия можно применять до этой температуры. Полное же плавление кварцевого стекла, когда из него можно изготавливать изделия, происходит при 1500–1600 °С.

Стекло марки «пирекс» является боросиликатным стеклом с содержанием не менее 80 %  $\text{SiO}_2$ , 12–13 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 3–4 %  $\text{Na}_2\text{O}$  и 1–2 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Оно широко применяется для изготовления стеклянного оборудования в биотехнологической промышленности. Температура размягчения стекла пирекс до динамической вязкости в  $10^{11}$  пуаз составляет 580–590 °С. Тем не менее это стекло пригодно для работ при температурах до 800 °С, но без избыточного давления. При использовании вакуума температуру изделий из стекла пирекс не следует поднимать выше 650 °С.

Температура размягчения термостойкого стекла для изготовления лабораторной посуды до вязкости  $10^{11}$  пуаз составляет 540–640 °С. Таким образом, изделия из стекла можно уверенно применять в диапазоне температур от –50 до 500 °С.

Для выбора температурного интервала эксплуатации изделий из термопластов также используют температуры размягчения ( $t_p$ ). Эти значения для широкого ряда полимерных материалов приведены в табл. 2.6.

Т а б л и ц а 2.6

**Температуры размягчения полимерных материалов**

| Пластмасса                | $t_p$ , °C | Пластмасса                    | $t_p$ , °C |
|---------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| Аминопласты               | 100        | Пенополиуретаны               | 230        |
| Асботекстолит             | 130        | Пентапласты                   | 160        |
| Асбостеклотекстолит       | 130        | Полимеры эпоксидные           | 150–170    |
| Википласт                 | 180        | Полимеры кремний-органические | 220–250    |
| Гетинакс                  | 150        | Полиакрилаты                  | 65         |
| Дифлон                    | 150        | Полиамиды                     | 190        |
| Древесно-слоистый пластик | 150        | Полиарилаты                   | 190        |
| Делан                     | 150        | Поливинилфторид               | 196        |
| Капролон                  | 190        | Поливинилхлорид               | 80         |
| Капрон                    | 215        | Полиимиды                     | 250        |
| Карбамидные смолы         | 75         | Поликарбонаты                 | 220        |
| Лавсан                    | 155        | Полиметил-метакрилат          | 120        |
| Нейлон                    | 60         | Полипропилен                  | 152        |
| Ниплон                    | 330        | Полистирол                    | 90         |
| Оргстекло СОЛ             | 90         | Полиуретан                    | 85         |
| Оргстекло 2-55            | 133        | Полиформальдегид              | 177        |
| Пенопласт изолан          | 210        | Полиэтилен                    | 90         |
| Пенопласты                | 140        | Полиэтилен-терефталат         | 130        |
| Пенопласты эпоксидные     | 170        |                               |            |

| Пластмасса               | $t_p, ^\circ\text{C}$ | Пластмасса | $t_p, ^\circ\text{C}$ |
|--------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| Полиэфиры                | 115                   | Целлофан   | 60                    |
| Терилен                  | 264                   | Целлулоид  | 40                    |
| Фторопласт-4<br>(тефлон) | 260                   |            |                       |

## 2.2. Удельная плотность

Масса ( $m$ ) является фундаментальной мерой количества вещества. Вес ( $w$ ) – мера силы, создаваемой массой, и эта сила – сила, создаваемая притяжением другого тела. Поэтому на поверхности Земли масса объекта определяется делением веса объекта на  $9,8 \text{ м/с}^2$  (ускорение свободного падения на поверхности Земли). Поскольку в технике сравнивают объекты на поверхности Земли, обычно говорят о весе объекта, а не о его массе. Пространство, которое занимает масса, это его объем, а произведение массы на единицу объема – удельная плотность.

Плотность ( $\rho$ ) материала зависит от фазы, в которой она находится, и от температуры. (Плотность жидкостей и газов напрямую зависит от температуры.) Вода в жидком состоянии имеет плотность  $1 \text{ г/см}^3 = 1000 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $4 ^\circ\text{C}$ . Плотность льда  $0,917 \text{ г/см}^3$  при  $0 ^\circ\text{C}$ , таким образом, лед легче воды. Следует отметить, что подобное уменьшение плотности для твердой фазы является необычным. Почти для всех прочих веществ плотность твердой фазы больше, чем плотность жидкой фазы. Водяной пар (насыщенный парами воды воздух) имеет плотность  $0,051 \text{ г/см}^3$ .

Единицы, используемые для выражения плотности: грамм/кубический сантиметр, килограмм/кубический метр, грамм/миллилитр, грамм/литр, фунт на кубический дюйм, фунт на кубический фут и т. д. Очевидно, что для сравнения плотности материалов нужно использовать одну систему измерений.

В табл. 2.7–2.11 приведены данные о плотности различных материалов.

Т а б л и ц а 2.7

**Плотность черных металлов**

| Материал                              | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Сталь 10 ГОСТ 1050-88                 | 7856                                 |
| Сталь 20 ГОСТ 1050-88                 | 7859                                 |
| Сталь 40 ГОСТ 1050-88                 | 7850                                 |
| Сталь 60 ГОСТ 1050-88                 | 7800                                 |
| С235-С375 ГОСТ 27772-88               | 7850                                 |
| Ст3пс ГОСТ 380-2005                   | 7850                                 |
| Чугун ковкий КЧ 70-2 ГОСТ 1215-79     | 7000                                 |
| Чугун высокопрочный ВЧ35 ГОСТ 7293-85 | 7200                                 |
| Чугун серый СЧ10 ГОСТ 1412-85         | 6800                                 |
| Чугун серый СЧ20 ГОСТ 1412-85         | 7100                                 |
| Чугун серый СЧ30 ГОСТ 1412-85         | 7300                                 |

Т а б л и ц а 2.8

**Плотность цветных металлов и сплавов**

| Материал                             | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Алюминий и сплавы алюминиевые</b> |                                      |
| Силумин АК12Ж ГОСТ 1583-93           | 2700                                 |
| Сплав АК12 ГОСТ 1583-93              | 2710                                 |
| Сплав АК5М ГОСТ 1583-93              | 2640                                 |
| Сплав АК7 ГОСТ 1583-93               | 2700                                 |
| Сплав АО9-1 ГОСТ 14113-78            | 2700                                 |



Окончание табл. 2.8

| Материал                          | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Баббиты оловянные и свинцовые     |                                      |
| Б83 ГОСТ 1320-74                  | 7380                                 |
| Б87 ГОСТ 1320-74                  | 7300                                 |
| БН ГОСТ 1320-74                   | 9550                                 |
| Магний и сплавы магниевые         |                                      |
| Сплав МЛ10 ... МЛ19 ГОСТ 2856-79  | 1810                                 |
| Сплав ВМЛ5                        | 1890                                 |
| Сплав ВМЛ9                        | 1850                                 |
| Медь и медные сплавы              |                                      |
| Бронза оловянная БрО10С10         | 8800                                 |
| Бронза оловянная БрО19            | 8600                                 |
| Бронза оловянная БрОС10-10        | 9100                                 |
| Бронза оловянная БрОА10-1         | 8750                                 |
| Бронза БрА10ЖЗМч2 ГОСТ 493-79     | 8200                                 |
| Бронза БрА9ЖЗЛ ГОСТ 493-79        | 8200                                 |
| Бронза БрМц5 ГОСТ 18175-78        | 8600                                 |
| Латунь Л60 ГОСТ 15527-2004        | 8800                                 |
| Латунь ЛА ГОСТ 1020-97            | 8500                                 |
| Медь М0, М1, М2, М3 ГОСТ 859-2001 | 8940                                 |
| Медь МСр1 ГОСТ 16130-90           | 8900                                 |
| Титан и титановые сплавы          |                                      |
| ВТ1-0 ГОСТ 19807-91               | 4500                                 |
| ВТ14 ГОСТ 19807-91                | 4500                                 |
| ВТ20Л ГОСТ 19807-91               | 4470                                 |

Т а б л и ц а 2.9

**Плотность прочих металлов**

| Материал                       | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Вольфрам ВА ГОСТ 18903-73      | 19 250                               |
| Золото 99,9 ГОСТ 6835-2002     | 19 320                               |
| Индий ИНО ГОСТ 10297-94        | 7300                                 |
| Кадмий КДО ГОСТ 1467-93        | 8640                                 |
| Олово О1пч ГОСТ 860-75         | 7300                                 |
| Палладий Пд 99,8 ГОСТ 13462-79 | 12 160                               |
| Платина Пд 99,8 ГОСТ 13498-79  | 21 450                               |
| Свинец С0 ГОСТ 3778-98         | 11 400                               |
| Серебро 99,9 ГОСТ 6836-2002    | 11 500                               |
| Цинк Ц1 ГОСТ 3640-94           | 7130                                 |

Т а б л и ц а 2.10

**Плотность полимерных материалов**

| Материал                              | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Фторопласты</b>                    |                                      |
| Ф-4 ГОСТ 10007-80 Е                   | 2100                                 |
| Фторопласт-1 ГОСТ 13744-87            | 1400                                 |
| Фторопласт-2 ГОСТ 13744-87            | 1700                                 |
| Фторопласт-3 ГОСТ 13744-87            | 2710                                 |
| Фторопласт-4Д ГОСТ 14906-77           | 2150                                 |
| <b>Термопласты</b>                    |                                      |
| Дакрил-2М ТУ 2216-265-057 57 593-2000 | 1190                                 |

О к о н ч а н и е   т а б л . 2.10

| Материал   | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|--|--------------------------------------|
| Полиметилметакрилат ЛПТ ТУ 6-05-952-74                   | 1180                                 |
| Полиметилметакрилат суспензионный<br>ЛСОМ ОСТ 6-01-67-72 | 1190                                 |
| Винипласт УВ-10 ТУ 6-01-737-72                           | 1450                                 |
| Поливинилхлоридный пластикат ГОСТ 5960-72                | 1400                                 |
| Полиамид ПА6 блочный Б ТУ 6-05-988-87                    | 1150                                 |
| Полиамид ПА66 литьевой ОСТ 6-06-369-74                   | 1140                                 |
| Капролон В ТУ 6-05-988                                   | 1150                                 |
| Капролон ТУ 6-06-309-70                                  | 1130                                 |
| Поликарбонат   | 1200                                 |
| Полипропилен ГОСТ 26996-86                               | 900                                  |
| Полиэтилен СД  | 960                                  |
| Лавсан литьевой ТУ 6-05-830-76                           | 1320                                 |
| Лавсан ЛС-1 ТУ 6-05-830-76                               | 1530                                 |
| Стиропласт АБС 0809Т ТУ 2214-019-002 03521-96            | 1050                                 |
| Полистирол блочный ГОСТ 20282-86                         | 1050                                 |
| Сополимер стирола МСН ГОСТ 12271-76                      | 1060                                 |
| Полистирол ударопрочный УПС-0505 ГОСТ 28250-89           | 1060                                 |
| Стеклопластик ВПС-8                                      | 1900                                 |
| Стеклотекстолит конструкционный КАСТ-В<br>ГОСТ 10292-74  | 1850                                 |
| Винилискожа-НТ ГОСТ 10438-78                             | 1440                                 |
| Резина 6Ж ТУ 38-005-1166-98                              | 1050                                 |
| Резина ВР-10 ТР 18-962                                   | 1800                                 |
| Стекло органическое техническое<br>ТОСНГОСТ 17622-72     | 1180                                 |

**Плотность керамических материалов и древесины**

| Материал                      | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Древесина, пробка             | 480                                  |
| Древесина, лиственница        | 660                                  |
| Древесина, липа               | 530                                  |
| Древесина, ель                | 450                                  |
| Древесина, сосна              | 520                                  |
| Древесина, береза             | 650                                  |
| Древесина, бук                | 690                                  |
| Бумага                        | 700–1200                             |
| Стекло листовое ГОСТ 111-2001 | 2500                                 |
| Кирпич                        | 1400–2100                            |
| Фарфор                        | 2300                                 |
| Бетон                         | 2000–2200                            |
| Цемент                        | 2800–3000                            |

**2.3. Теплопроводность**

Теплопроводность ( $\lambda$ ) является неотъемлемым свойством материала, которое характеризует его способность проводить тепло. Передача тепла за счет проводимости включает передачу энергии внутри материала без какого-либо движения материала в целом. Проводимость возникает тогда, когда температурный градиент существует в твердой (или стационарной жидкой) среде. Проводящий тепловой поток возникает в направлении уменьшения температуры, потому что более высокая температура соответствует более высокой молекулярной энергии или более активному молекулярному движению. Энергия переносится от более энергичных молекул, когда сталкиваются соседние молекулы, к менее энергичным.

Теплопроводность определяется как количество тепла ( $Q$ ), передаваемого через единичную толщину ( $L$ ) в направлении, перпендикулярном поверхности единичной площади ( $A$ ) из-за градиента удельной температуры ( $\Delta T$ ) в установившемся режиме и когда передача тепла зависит только от градиента температуры:

$$\lambda = Q \times L / (A \times \Delta T).$$

Теплопроводность большинства материалов напрямую зависит от температуры, поэтому при проектировании оборудования необходимо учитывать этот факт. Теплопроводность наиболее широко используемых металлов и сплавов приведена в табл. 2.12, сталей – в табл. 2.13, прочих материалов с низкой теплопроводностью – в табл. 2.14.

Т а б л и ц а 2.12

**Теплопроводность металлов**

| Металлы или сплав, масс. % | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|----------------------------|---------------------|--|
| Алюминий 99                | 18                  | 211  |
|                            | 30                  | 208,1  |
|                            | 100                 | 205,2  |
|                            | 400                 | 318,2  |
| Висмут                     | –186                | 10,47  |
|                            | 0                   | 7,411  |
|                            | 100                 | 6,866  |
| 96Bi + 3,5Pb (объем.)      | 44                  | 5,401  |
| 90Bi + 3,5Sn (объем.)      | 44                  | 5,401  |
| 80Bi + 20Sb                | 0                   | 6,364  |
| 50Bi + 25Pb + 25Sn         | 20                  | 16,24  |
| Вольфрам                   | 0                   | 160,4  |
|                            | 2227                | 148,2  |

Продолжение табл. 2.12

| Металл или сплав, масс. % | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ |
|---------------------------|---------------------|--|
| Железо ковачное чистое    | 0                   | 59,45  |
|                           | 100                 | 56,94  |
| Золото                    | 0                   | 311,5  |
|                           | 97                  | 312,3  |
| Иридий                    | 17                  | 59,03  |
| Кадмий                    | 0                   | 92,65  |
|                           | 100                 | 85,62  |
| Калий                     | 5                   | 97,97  |
|                           | 57,6                | 90,85  |
| 62,9K + 37,1Na            | 42                  | 25,92  |
| Кобальт                   | 30                  | 487,8  |
| Латунь Л96                | 0                   | 103  |
|                           | 100                 | 118,5  |
| Литий                     | 0                   | 71,18  |
|                           | 101,3               | 75,36  |
| Магний                    | 0–100               | 157,4  |
| 92Mg + 8Al                | 20–200              | 62,8–79,55                                     |
| 92Mg + 8Cu                | 20–200              | 125,6–132,3                                    |
| 88Mg + 10Al + 2Si         | 20–200              | 121,4–133,1                                    |
| Марганец                  | 18                  | 21,77  |
| Медь                      | –183                | 465,2  |
|                           | 0                   | 385,2  |
|                           | 100                 | 385,2  |

Продолжение табл. 2.12

| Металл или сплав, масс. %        | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ |
|----------------------------------|---------------------|--|
| 96Cu + 3Si + 1Mn (эвердюр)       | 20                  | 33,08  |
| 84Cu + 4Ni + 12Mn (манганин)     | 18                  | 21,73  |
|                                  | 100                 | 26,42  |
| 60Cu + 40Ni (мельхиор)           | 18                  | 22,61  |
|                                  | 100                 | 26,8   |
| 95Cu + 5Al (бронза алюминиевая)  | 20                  | 82,48  |
| 90Cu + 10Sn (бронза оловянная)   | 20                  | 41,87  |
| Молибден                         | 17                  | 144,9  |
| Натрий                           | 21,2                | 132,7  |
| Никель 99                        | –160                | 54,01  |
|                                  | 18                  | 58,62  |
|                                  | 300                 | 52,75  |
| 79,5Ni + 13Cr + 6,5Fe (никонель) | 70                  | 15,07  |
| Олово                            | –170                | 81,64  |
|                                  | 0                   | 64,06  |
|                                  | 100                 | 59,45  |
| Палладий                         | 25                  | 76,2   |
| 90Pd + 10Pt                      | 25                  | 56,1   |
| Платина                          | 0–200               | 69,92  |
| Родий                            | 17                  | 87,92  |
| Ртуть<br>твердая                 | –269,3              | 167,5  |
|                                  | –44,2               | 27,8   |

О к о н ч а н и е   т а б л . 2.12

| Металл или сплав, масс. % | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|---------------------------|---------------------|--|
| жидкая                    | 0                   | 8,081  |
|                           | 50                  | 8,75   |
| Свинец                    | 18                  | 34,62  |
|                           | 100                 | 34,12  |
| Серебро 99,9              | -160                | 417,8  |
|                           | 0                   | 458,9  |
|                           | 10–97               | 403,2  |
| Сурьма                    | 0–30                | 17,58  |
| Тантал                    | 17                  | 54,43  |
|                           | 1827                | 82,9   |
| Цинк                      | 18                  | 111  |
| Чугун                     | 18                  | 45,64  |
|                           | 100                 | 45,22  |

Т а б л и ц а   2.13

**Теплопроводность (Вт/(м · К)) некоторых сталей  
при различных температурах**

| Группа стали  | Температура, $^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |      |     |     |
|---------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|
|               | 100                           | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700 | 800 |
| Углеродистая: |                               |      |      |      |      |      |     |     |
| марка 15      | 54,4                          | 50,2 | 46,1 | 41,9 | 37,7 | 33,5 | —   | —   |
| марка 30      | 50,2                          | 46,1 | 41,9 | 37,7 | 33,5 | 29,3 | —   | —   |
| Молибденовая  | 41,9                          | —    | —    | —    | —    | —    | —   | —   |



Окончание табл. 2.13

| Группа стали             | Температура, °С |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                          | 100             | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  |
| Хромистая                | 22,4            | 21,2 | –    | 23,5 | –    | 22   | –    | –    |
| Хромомолибденовая:       |                 |      |      |      |      |      |      |      |
| Х10С2М                   | 18,4            | –    | 21,7 | –    | –    | 24,7 | 22   | –    |
| 12 ХМ                    | 37,7            | 35,6 | 33,5 | –    | –    | –    | –    | –    |
| Хромоникелевая           | 16,9            | 19,2 | 21,5 | 24,4 | 26,7 | 29,7 | 32,6 | 36,1 |
| Хромоникель-вольфрамовая | 15,5            | –    | 18,1 | –    | 21,2 | 22   | –    | –    |

Таблица 2.14

**Теплопроводность органических и неорганических материалов**

| Материал           | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|--------------------|---------------------|--|
| Асбестовая ткань   | 20                  | 0,279  |
| Асбестовое волокно | 0                   | 0,112  |
|                    | 100                 | 0,121  |
| Асфальт            | 20                  | 0,744  |
| Базальт            | 20                  | 2,175  |
| Бетон              | 20                  | 0,922  |
| Боксит             | 600                 | 0,557  |
| Войлок шерстяной   | 40                  | 0,073  |
| Гипс               | 0                   | 1,297  |
| Глина огнеупорная  | 300–600             | 0,875–0,925                                    |

Продолжение табл. 2.14

| Материал                               | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|--|---------------------|--|
| Гранит                                 | 20                  | 3,419  |
| Дерево:                                |                     |  |
| береза, по волокнам                    | 29                  | 0,172  |
| дуб (плотность 819 кг/м³), по волокнам | 20                  | 0,349  |
| Диатомитовая земля                     | 20                  | 0,055  |
| Древесный уголь                        | 81                  | 0,076  |
| Известняк                              | 0                   | 2,07   |
| Известь глинистая                      | 20                  | 3,256  |
| Каменный уголь                         | 20                  | 0,186  |
| Картон гофрированный                   | 20                  | 0,064  |
| Кирпич:                                |                     |  |
| изоляционный                           | 100                 | 0,14   |
| огнеупорный                            | 200                 | 1,006  |
| строительный                           | 20                  | 0,233–0,291                                    |
| Клинкер                                | 30                  | 0,163  |
| Кокс порошкообразный                   | 100                 | 0,191  |
| Лед                                    | 0                   | 2,25   |
| Мрамор                                 | 20                  | 3,268  |
| Накипь котельная                       | 65                  | 1,31–3,14                                      |
| Опилки древесные                       | 20                  | 0,07   |
| Парафин                                | 20                  | 0,267  |

Окончание табл. 2.14

| Материал                                     | $T, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|--|---------------------|--|
| Песок:                                       |                     |  |
| сухой  | 20                  | 0,326  |
| влажный                                      | 20                  | 1,13   |
| Песчаник (плотность 2259 кг/м <sup>3</sup> ) | 40                  | 1,84   |
| Портландцемент                               | 30                  | 0,302  |
| Пробка гранулированная                       | 20                  | 0,038  |
| Резина мягкая                                | 20                  | 0,167  |
| Снег уплотненный                             | 0                   | 0,048  |
| Стекло боросиликатное 3С-9                   | 25                  | 0,92   |
| Стекло пирекс                                | 25                  | 1,34   |
| Стеклянная вата                              | 0                   | 0,037  |
| Текстолит                                    | 20                  | 0,645–0,93                                     |
| Торфоплиты                                   | 50                  | 0,064  |
| Фарфор                                       | 95                  | 1,04   |
| Фибра (пластины)                             | 20                  | 0,049  |
| Флюорит                                      | 0                   | 10,4   |
| Шерсть минеральная                           | 50                  | 0,047  |
| Шлакобетон                                   | 20                  | 0,93   |
| Шлаковая вата                                | 100                 | 0,07   |
| Штукатурка                                   | 20                  | 0,779  |
| Хлопок (плотность 81 кг/м <sup>3</sup> )     | 20                  | 0,057  |
| Эбонит                                       | 20                  | 0,158  |

## 2.4. Линейный коэффициент теплового расширения

Когда к материалу подводится тепло, средняя амплитуда колебаний атомов для большинства материалов увеличивается. Это, в свою очередь, увеличивает расстояние между атомами, что вызывает расширение материала. Если материал не проходит фазовое изменение, расширение может быть легко связано с изменением температуры. Линейный коэффициент теплового расширения ( $\alpha$ ) описывает относительное изменение длины материала при изменении температуры в градусах:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_i \cdot \Delta T},$$

где  $\Delta l$  – изменение длины;  $l_i$  – полная начальная длина;  $\Delta T$  – изменение температуры.

Переставляя местами члены этого уравнения, можно видеть, что если известен линейный коэффициент теплового расширения, изменение длины компонентов может быть рассчитано для каждой степени изменения температуры. Отмечается и обратный эффект: если энергия удаляется из материала, тогда температура объекта будет уменьшаться, что приведет к его сжатию.

Термическое расширение (и сжатие) должно учитываться при проектировании изделий с близким допуском, поскольку эти допуски будут меняться с изменением температуры, если материалы, используемые в конструкции, имеют разные коэффициенты теплового расширения. Следует также понимать, что тепловое расширение может вызвать значительное напряжение в компонентах конструкции, если сама конструкция не позволяет расширять и сокращать их. Явление теплового расширения нужно учитывать при проектировании мостов, зданий, химических аппаратов. Оно может лечь в основу при изготовлении, например, термостатов и других термочувствительных датчиков, использующих свойство линейного расширения. В табл. 2.15 приведены коэффициенты линейного расширения для различных металлов, а в табл. 2.16 – для органических и неорганических материалов.

Т а б л и ц а 2.15

**Линейное расширение металлов и сплавов**

| Металл или сплав                | $\alpha_{20} \cdot 10^6, (^\circ\text{C})^{-1}$ | $T, ^\circ\text{C}$ |
|---------------------------------|---|---------------------|
| Алюминий                        | 22,4  | 20–600              |
| Бронза:                         |   |                     |
| 81,2 % Cu + 8,6 % Zn + 9,9 % Sn | 17,74   | 0–80                |
| 96,0 % Cu + 2,6 % Zn + 0,6 % Mn | 16,92   | 16–100              |
| Железо литое                    | 11,79   | 0–750               |
| Золото                          | 14,26   | 0–520               |
| Кадмий                          | 28,79   | 8–95                |
| Латунь:                         |   |                     |
| 73,7 % Cu + 24,2 % Zn + 1,5 Sn  | 18,12   | 0–80                |
| 56,4 % Cu + 43,4 Zn             | 19,31   | 16–100              |
| Магний                          | 25,44   | 20–500              |
| Медь                            | 16,23   | 0–625               |
| Молибден                        | 5,15  | 20–400              |
| Никель                          | 12,62   | 20–300              |
| Олово                           | 21,38   | 8–95                |
| Платина                         | 9,11  | (–183)–16           |
| Серебро                         | 19,51   | 20–500              |
| Свинец                          | 27,56   | 14–94               |
| Сталь литая                     | 11,39   | 0–750               |
| Сурьма                          | 9,76  | 11–98               |
| Хром                            | 8,24  | 20–500              |
| Цинк                            | 28,35   | 9–96                |
| Чугун                           | 10,02   | 0–625               |

Т а б л и ц а 2.16

**Линейное расширение  
органических и неорганических материалов**

| Материал                     | $T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha \cdot 10^6, (^\circ\text{C})^{-1}$ |
|------------------------------|---------------------|--|
| Алмаз                        | 20–40               | 1,18                                       |
| Алунд (искусственный корунд) | 25–900              | 8,7  |
| Бакелит                      | 20–60               | 22   |
| Боксит                       | 25–100              | 4,4  |
| Воск белый                   | 10–26               | 230  |
| Графит                       | 20–40               | 7,86                                       |
| Известняк                    | 25–100              | 9  |
| Каменная соль                | 20–40               | 40,4                                       |
| Карборунд                    | 25–100              | 6,58                                       |
| Каучук                       | 16–25               | 77,0                                       |
| Лед                          | (–20)–1             | 51   |
| Парафин                      | 0–38                | 130,30                                     |
| Песчаник                     | 20–40               | 7,12                                       |
| Резина вулканизированная     | 0–18                | 63,60                                      |
| Стекло пирекс                | 16–500              | 0,57                                       |
| Уголь газовый (ретортный)    | 20–40               | 5,40                                       |
| Фарфор                       | 20–790              | 4,13                                       |
| Шпат плавиновый              | 0–100               | 19,50                                      |
| Эбонит                       | 25–35               | 84,2                                       |

## 2.5. Электрическая проводимость

Хорошо известно, что одна из субатомных частиц атома – электрон. Электроны несут отрицательный электростатический заряд и при определенных условиях могут переходить от атома к атому. Направление движения между атомами является случайным, если сила не заставит электроны двигаться в одном направлении. Электропроводность является мерой того, насколько хорошо материал обеспечивает движение электрического заряда. Это отношение плотности тока к напряженности электрического поля. Единица его измерения – сименс на метр (См/м), но значения проводимости часто сообщаются как % IACS; IACS – акроним Международного стандарта медной проволоки, который был принят Международной электрохимической комиссией 1913 г. Проводимость отожженной меди ( $5,8 \cdot 10^7$  См/м) определяется как 100 % IACS при 20 °C. Все остальные значения проводимости даются в процентах от проводимости отожженной меди. Поэтому железо с удельной проводимостью  $1,04 \cdot 10^7$  См/м имеет удельную электропроводность приблизительно 18 % от массы отожженной меди, и это отображается как 18 % IACS.

Интересным фактом является то, что коммерчески чистые медные продукты теперь часто имеют значения проводимости IACS, превышающие 100 % IACS, поскольку технологии обработки улучшились с момента принятия стандарта в 1913 г., теперь можно удалить из металла больше примесей, влияющих на проводимость.

Значения проводимости в См/м можно преобразовать в % IACS, умножив значение проводимости на  $1,7241 \cdot 10^{-6}$ . Когда значения электропроводности сообщаются в мкСм/см, значение проводимости умножается на 172,41 для преобразования в значение % IACS. Величиной, обратной проводимости, является удельное сопротивление материала электрическому току. Оно измеряется в Ом/м и позволяет судить о том, насколько хорошо материал проводит электрический ток.

На величину электропроводности влияют различные факторы, такие как химический состав материала и состояние кристаллических структур. Поэтому информация об электропроводности может

быть использована для измерения чистоты материала, его структурных особенностей, проверки правильности термической обработки материалов. Свойства различных материалов, проводящих электрический ток, приведены в табл. 2.17.

Т а б л и ц а 2.17

**Электрическая проводимость и электрическое сопротивление  
металлов и сплавов при 0 °С**

| Материал                      | Проводимость |                                       | Сопротивление,<br>Ом · м                     |
|-------------------------------|--------------|---------------------------------------|--|
|                               | % IACS       | См/м                                  |  |
| Алюминий                      | 61,00        | $3,570 \cdot 10^7$                    | $2,752 \cdot 10^{-7}$                        |
| Баббит на основе свинца       | 6,00         | $3,480 \cdot 10^6$                    | $2,874 \cdot 10^{-7}$                        |
| Бериллий                      | 38,9–43,1    | $2,5 \cdot 10^7$ – $2,256 \cdot 10^7$ | $4,0 \cdot 10^{-8}$ – $4,43 \cdot 10^{-8}$   |
| Ванадий                       | 6,60         | $3,828 \cdot 10^6$                    | $2,612 \cdot 10^{-7}$                        |
| Висмут                        | 1,64         | —                                     | $1,050 \cdot 10^{-6}$                        |
| Вольфрам                      | 31,40        | $1,821 \cdot 10^7$                    | $5,491 \cdot 10^{-8}$                        |
| Галлий<br>поликристаллический | 11,46        | —                                     | $1,505 \cdot 10^{-7}$                        |
| Гафний                        | 4,91         | —                                     | $3,510 \cdot 10^{-7}$                        |
| Графит                        | 0,22         | $1,276 \cdot 10^5$                    | $7,837 \cdot 10^{-6}$                        |
| Железо чистое                 | 18,00        | $1,044 \cdot 10^7$                    | $9,579 \cdot 10^{-8}$                        |
| Золото ювелирное              | 73,40–83,69  | $4,257 \cdot 10^7$                    | $2,06 \cdot 10^{-8}$ – $2,349 \cdot 10^{-8}$ |
| Золото чистое                 | 70,00        | $4,060 \cdot 10^7$                    | $2,463 \cdot 10^{-8}$                        |
| Индий                         | 24,00        | —                                     | $7,184 \cdot 10^{-8}$                        |
| Иридий и его сплавы           | 32,60–36,61  | $1,891 \cdot 10^7$                    | $5,289 \cdot 10^{-8}$ – $4,71 \cdot 10^{-8}$ |
| Кадмий                        | 25,00–25,20  | $1,462 \cdot 10^7$                    | $6,842 \cdot 10^{-8}$ – $7,30 \cdot 10^{-8}$ |
| Карбид хрома                  | 20,53        | —                                     | $8,400 \cdot 10^{-8}$                        |
| Кобальт                       | 27,60        | $1,601 \cdot 10^7$                    | $6,247 \cdot 10^{-8}$                        |



Продолжение табл. 2.17

| Материал                         | Проводимость |   | Сопротивление,<br>Ом · м                     |
|----------------------------------|--------------|---|--|
|                                  | % IACS       | См/м                                    |  |
| Константан                       | 3,52         | $2,042 \cdot 10^6$                      | $4,898 \cdot 10^{-7}$                        |
| Латунь отоженная                 | 28,00        | $1,624 \cdot 10^7$                      | $6,158 \cdot 10^{-8}$                        |
| Латунь желтая                    | 56,00        | $3,248 \cdot 10^7$                      | $3,079 \cdot 10^{-8}$                        |
| Литий                            | 18,44–20,20  | $1,172 \cdot 10^7$                      | $8,535 \cdot 10^{-8}$ – $9,35 \cdot 10^{-8}$ |
| Марганец альфа-фаза              | 0,90         | —                                       | $1,440 \cdot 10^{-6}$                        |
| Металлокерамика<br>Сг- $Al_2O_3$ | 19,82        | —                                       | $8,700 \cdot 10^{-8}$                        |
| Мишметалл                        | 2,16         | —                                       | $8,000 \cdot 10^{-7}$                        |
| Молибден                         | 33,00        | $1,914 \cdot 10^7$                      | $5,225 \cdot 10^{-8}$                        |
| Монель                           | 3,60         | $2,088 \cdot 10^6$                      | $4,789 \cdot 10^{-7}$                        |
| Мышьяк                           | 6,63         | —                                       | $2,600 \cdot 10^{-7}$                        |
| Ниобий                           | 13,20        | —                                       | $1,600 \cdot 10^{-7}$                        |
| Олово                            | 15,00        | $8,700 \cdot 10^6$                      | $1,149 \cdot 10^{-7}$                        |
| Олово (10 % серебра)             | 16,60        | $9,628 \cdot 10^6$                      | $1,039 \cdot 10^{-7}$                        |
| Оловянная фольга                 | 4,20         | $2,436 \cdot 10^6$                      | $4,105 \cdot 10^{-7}$                        |
| Осмий                            | 18,20–21,23  | $1,056 \cdot 10^7$                      | $9,473 \cdot 10^{-8}$ – $8,12 \cdot 10^{-8}$ |
| Палладий                         | 16,00–17,36  | $9,280 \cdot 10^6$                      | $9,930 \cdot 10^{-8}$                        |
| Платина техническая              | 11,60        | $6,728 \cdot 10^6$                      | $1,486 \cdot 10^{-7}$                        |
| Платина чистая                   | 16,28–17,50  | $9,442 \cdot 10^6$                      | $9,85 \cdot 10^{-8}$ – $1,059 \cdot 10^{-7}$ |
| Платино-иридиевые<br>сплавы      | 9,10         | $5,278 \cdot 10^6$                      | $1,895 \cdot 10^{-7}$                        |
| Платино-никелевые<br>сплавы      | 7,40–13,60   | $4,292 \cdot 10^6$ – $7,888 \cdot 10^6$ | $1,268 \cdot 10^{-7}$ – $2,33 \cdot 10^{-7}$ |
| Ртуть                            | 1,80         | $1,044 \cdot 10^6$                      | $9,579 \cdot 10^{-7}$                        |
| Рутений                          | 22,70        | $1,317 \cdot 10^7$                      | $7,595 \cdot 10^{-8}$                        |

Окончание табл. 2.17

| Материал                         | Проводимость  |   | Сопротивление,<br>Ом · м                      |
|----------------------------------|---------------|---|---|
|                                  | % IACS        | См/м                                    |   |
| Рутений контактный               | 4,00          | $2,320 \cdot 10^6$                      | $4,310 \cdot 10^{-7}$                         |
| Свинец                           | 8,35–8,40     | $4,872 \cdot 10^6$                      | $2,064 \cdot 10^{-7}$ – $2,053 \cdot 10^{-7}$ |
| Свинец отожженный                | 8,30          | $4,814 \cdot 10^6$                      | $2,077 \cdot 10^{-7}$                         |
| Серебро                          | 105,00–108,40 | $6,090 \cdot 10^7$                      | $1,591 \cdot 10^{-8}$ – $1,642 \cdot 10^{-8}$ |
| Сталь 1/2 % Сг                   | 5,95          |   | $2,900 \cdot 10^{-7}$                         |
| Сурьма                           | 4,40–4,66     | $2,552 \cdot 10^6$                      | $3,70 \cdot 10^{-7}$ – $3,918 \cdot 10^{-7}$  |
| Сурьмянистый<br>оловянный припой | 11,90         | $6,902 \cdot 10^6$                      | $1,449 \cdot 10^{-7}$                         |
| Талий                            | 11,49         |   | $1,500 \cdot 10^{-7}$                         |
| Тантал                           | 13,90         | $8,062 \cdot 10^6$                      | $1,240 \cdot 10^{-7}$                         |
| Хром                             | 8,80          | $5,104 \cdot 10^6$                      | $1,959 \cdot 10^{-7}$                         |
| Цезий                            | 8,62          | $4,500 \cdot 10^6$                      | $2,000 \cdot 10^{-7}$                         |
| Цинк технический –<br>прокат     | 28,00         | $1,624 \cdot 10^7$                      | $6,158 \cdot 10^{-8}$                         |
| Цинковое литье                   | 25,00–27,00   | $1,45 \cdot 10^7$ – $1,566 \cdot 10^7$  | $6,386 \cdot 10^{-8}$ – $6,897 \cdot 10^{-8}$ |
| Цирконий                         | 3,40–4,20     | $1,972 \cdot 10^6$ – $2,436 \cdot 10^6$ | $4,105 \cdot 10^{-7}$ – $5,071 \cdot 10^{-7}$ |

### 3. ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ. УСТОЙЧИВОСТЬ К КОРРОЗИИ

Наиболее важным химическим свойством материалов, применяемых в биотехнологии, является их устойчивость к коррозии. Коррозией называется ухудшение качества материала при воздействии на него окружающей среды. Так как защита от коррозии часто является основной частью затрат на техническое обслуживание оборудования и технических конструкций, правильный выбор материалов очень важен для обеспечения долгого срока их эксплуатации. Коррозия обычно не выражается в количественных значениях, отражающих скорость разрушения конструкции. Для этого используют качественные критерии, с помощью которых материалы подразделяются на высокоустойчивые, устойчивые, восприимчивые или очень восприимчивые к коррозии.

Коррозия возникает под действием различных факторов: света, кислорода воздуха, воды, химических реагентов. Так, разрушение поливинилхлорида или полиизоцианатов под действием солнечного света также относится к коррозии. Однако наиболее распространенным типом коррозии является электрохимический процесс окисления металлов. В этом случае коррозия является естественным процессом, который возникает из-за того, что неустойчивые материалы, например неблагородные металлы, стремятся вернуться к более стабильному состоянию. Только некоторые металлы, такие как золото, серебро и медь, могут быть найдены на земле в их естественном металлическом состоянии, так как они высокоустойчивы к коррозии. Остальные металлы встречаются лишь в виде оксидов или других соединений.

Например, железо – умеренно активный металл и легко окисляется кислородом воздуха в присутствии воды. Естественное состояние железа в природе – оксид железа, а наиболее распространенной железной рудой является гематит с химическим составом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Ржавчина, наиболее распространенный продукт коррозии железа, также имеет химический состав  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Металлургические процессы предусматривают восстановление оксидов или сульфидов металлов, что делает возможной обратную реакцию электрохимического окисления. В этом случае энергия, необходимая для извлечения металлов из их руд, напрямую связана с последующей тенденцией к высвобождению этой энергии в результате коррозии. Ряд электродвижущей силы (табл. 3.1) представляет собой ранжирование металлов по присущей им активности. Благородные металлы находятся на правой стороне ряда и имеют самый высокий положительный электрохимический потенциал. Наиболее активные металлы находятся на левой стороне и имеют самый высокий отрицательный электрохимический потенциал. Однако следует иметь в виду, что прямой зависимости между электрохимической активностью металлов и их практическим применением в технике не существует. Например, алюминий, как следует из его положения в ряду, является относительно реактивным металлом.

Среди конструкционных материалов только бериллий и магний более активны. В то же время, несмотря на большое количество энергии, необходимой на восстановление этих металлов, их обратное окисление происходит очень медленно. Своей высокой коррозионной стойкостью алюминий обязан барьерной оксидной пленке, которая плотно прилегает к поверхности и, даже если разрушается в результате химического или механического воздействия, тут же восстанавливается снова. На поверхности свежего среза, подверженного воздействию воздуха, защитная пленка имеет толщину всего около одного нанометра, но даже этого достаточно для защиты алюминия от коррозии. Поэтому для оценки коррозионной стойкости металлов необходимо принимать в расчет целый ряд факторов, таких как свойства оксидных пленок и примеси других элементов. Хорошо известно, что особо чистые металлы мало подвержены электрохимической коррозии, поскольку на их поверхности нет дефектов или включений, которые могут формировать гальванические пары.

Коррозия включает в себя два химических процесса – окисление и восстановление. Окисление представляет собой процесс удаления электронов из атома, а восстановление происходит, когда электрон добавляется к атому. Процесс окисления идет в области, которая называется анодом. На аноде положительно заряженные атомы покидают твердую поверхность и входят в электролит в виде ионов. Ионы оставляют свой отрицательный заряд в виде электронов в металле, которые движутся к месту расположения катода через проводящий путь. На катоде происходит соответствующая реакция восстановления и расходуются свободные электроны. Электрический баланс цепи восстанавливается на катоде, когда электроны реагируют с нейтрализующими положительно заряженными ионами, такими как протоны, в электролите.

Из этого описания видно, что для продолжения реакции коррозии необходимы четыре основных компонента: анод, катод, электролит с окисляющими веществами и прямое электрическое соединение между анодом и катодом. Атмосферный воздух является наиболее распространенным в природе окислителем, а природные воды, такие как дождевая и морская вода, – наиболее распространенными электролитами.

Т а б л и ц а 3.1

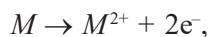
**Электрохимический ряд напряжений металлов**

| Металлы                     | Равновесие металл–ионы (единичной активности) | Электродный потенциал относительно водородного электрода при 25°C, В |
|-----------------------------|---|--|
| Благородные<br>или катодные | $Au \rightarrow Au^{3+}$                      | +1,498   |
|                             | $Pt \rightarrow Pt^{2+}$                      | +1,2   |
|                             | $Pd \rightarrow Pd^{2+}$                      | +0,987   |
|                             | $Ag \rightarrow Ag^{+}$                       | +0,799   |
|                             | $Hg \rightarrow Hg^{2+}$                      | +0,788   |
|                             | $Cu \rightarrow Cu^{2+}$                      | +0,337   |

О к о н ч а н и е   т а б л .   3.1

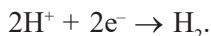
| Металлы              | Равновесие<br>металл–ионы<br>(единичной<br>активности) | Электродный потенциал<br>относительно<br>водородного электрода<br>при 25°С, В |
|----------------------|--|---|
|                      | $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}^+$                    | 0   |
|                      | $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+}$                 | –0,126  |
|                      | $\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+}$                 | –0,140  |
|                      | $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+}$                 | –0,236  |
|                      | $\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+}$                 | –0,250  |
|                      | $\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+}$                 | –0,403  |
|                      | $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$                 | –0,444  |
|                      | $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{2+}$                 | –0,744  |
|                      | $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+}$                 | –0,763  |
| Активные или анодные | $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+}$                 | –1,662  |
|                      | $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$                 | –2,363  |
|                      | $\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+$                    | –2,714  |
|                      | $\text{K} \rightarrow \text{K}^+$                      | –2,925  |

Типичным примером возникновения коррозии может быть металл, который имеет анодную и катодную области на одной и той же поверхности. Если поверхность становится влажной, коррозия может происходить за счет ионного обмена в слое поверхностной воды между анодом и катодом. Электронный обмен, т. е. электрический ток, будет проходить через объем металла. Коррозия будет протекать на анодном участке в соответствии с реакцией окисления, сопровождающейся передачей электронов:



где  $M$  – атом металла.

Полученные металлические катионы ( $M^+$ ) на поверхности металла превращаются в продукты коррозии, такие как оксиды, гидроксиды и т. д. Выделенные электроны проходят через объем металла (или другое электрическое соединение с низким сопротивлением) к катоду, где они потребляются. Катодные реакции, такие как образование водорода, приводят к замыканию цепочки электрохимических превращений:



Основные принципы коррозии, о которых было сказано выше, применимы к большинству видов коррозии, за исключением высокотемпературной коррозии. Однако процесс коррозии может быть как очень простым, так и очень сложным из-за разнообразия факторов, которые могут ему способствовать. Вот некоторые из них: состав материала, действующего в коррозионном элементе; термическая обработка и состояние напряжений материала; состав электролита; расстояние между анодом и катодом; температура; защитные оксиды и покрытие и т. д. Все это приводит к дроблению электрохимической коррозии на множество типов.

Коррозия обычно классифицируется по внешнему виду корродированного материала. Используемые классификации немного отличаются в зависимости от источника, но обычно выделяют восемь основных форм коррозии:

- равномерную или общую коррозию, распределена более или менее равномерно по поверхности материала;
- локализованную коррозию, ограничена небольшой площадью. Такая коррозия часто возникает из-за концентрированной ячейки. Концентрированная ячейка представляет собой электролитическую ячейку, в которой электродвижущая сила вызвана концентрацией некоторых компонентов в электролите. Это различие приводит к образованию различных анодных и катодных областей;
- точечную коррозию, ограничена небольшими участками и принимает форму полостей на поверхности;
- контактную коррозию, возникает в местах, где предотвращается легкий доступ к объемной среде, например, сопрягаемые поверхности двух компонентов;

– филиформную или подпленочную коррозию, возникает под некоторыми покрытиями в виде случайно распределенных нитевидных структур;

– межзернистую коррозию, протекает в основном на границах зерен или вдоль границ зерен;

– эксфолиативную коррозию (отшелушивание) – специфическая форма коррозии, проходит вдоль границ зерен, параллельных поверхности детали, что вызывает подъем материала и шелушение на поверхности. Продукты коррозии расширяются между непокрытыми слоями металла, образуя структуры, похожие на страницы книги. Отшелушивающая коррозия характерна для листовых, пластинчатых и экструдированных продуктов и обычно инициируется на неокрашенных или незапечатанных краях или отверстиях восприимчивых металлов;

– гальваническую коррозию, связана прежде всего с электрическим контактом материалов со значительно отличающимися электрохимическими потенциалами.

Коррозия часто сопряжена с механическими и температурными нагрузками материала. Это приводит к его быстрому разрушению под действием совокупности нескольких сил. Примером являются несколько распространенных явлений, приводящих к потере прочности материалов:

– экологический крекинг – хрупкое разрушение обычно пластичного материала, которое частично происходит из-за коррозионного воздействия окружающей среды;

– коррозионная усталость – усталостное растрескивание, которое характеризуется нехарактерно коротким временем инициации и/или скоростью роста из-за повреждения коррозией или накопления продуктов коррозии;

– высокотемпературная водородная атака – потеря прочности и пластичности стали из-за высокотемпературной реакции поглощенного водорода. Результатом реакции являются обезуглероживание и появление внутренних трещин;

– водородное охрупчивание – потеря пластичности металла в результате поглощения водорода;



– растворение жидкого металла – растрескивание одного металла, например стали, вызванное контактом с другим жидким металлом;

– стресс-коррозия – растрескивание металла из-за комбинированного действия коррозии и остаточного или приложенного растягивающего напряжения;

– эрозийная коррозия – реакция коррозии, ускоренная относительным движением коррозионной жидкости или металлической поверхности. Такая коррозия характерна для трубопроводов, имеющих изгибы, в которых возникают турбулентные потоки;

– фреттинг-коррозия – возникает при минимальном повторяющемся (локальном) перемещении двух поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды. Фреттинг-коррозии подвержены болтовые соединения, посадочные поверхности подшипников качения, листовые рессоры, шестерни, муфты и т. д. Она возникает вследствие непрерывного разрушения защитной оксидной пленки в точках подвижного контакта;

– селективная коррозия – разрушение одного или нескольких компонентов сплава или твердого раствора. Примером такой коррозии может быть коррозия, приводящая к селективному удалению цинка из медно-цинковых сплавов.

Коррозию также классифицируют по характеру среды, в которой она проходит. В этом случае выделяют пять основных типов коррозии:

– атмосферную коррозию, наблюдается при нахождении материала на открытом воздухе и под действием атмосферной влаги без дополнительной защиты поверхности, например, окрашивания;

– морскую коррозию, протекает в морской воде, которая представляет собой раствор электролитов. По типу морской коррозии происходит разрушение металлов в присутствии любых солевых растворов. Поэтому она характерна не только для морских судов, но и для биореакторов, использующихся для приготовления питательных сред, теплообменников, наполненных рассолом, и другого биотехнологического оборудования;

– биологическую (почвенную) коррозию, протекает под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов (например, усиление коррозии стали в грунтах сульфатредуцирующими бактериями).

Такая коррозия характерна для оборудования, соприкасающегося с почвой, а также для биореакторов;

– химическую коррозию, наблюдается в химически агрессивных средах, таких как растворы щелочей и кислот. Для биотехнологии весьма актуальной является коррозия под действием растворов органических кислот – уксусной, лимонной, молочной, яблочной или их смесей;

– жидкостную коррозию, протекает под действием жидкостей, которые не являются электролитами, например, органических растворителей.

Для количественной оценки коррозии используют шкалу устойчивости материалов. При этом скорость общей коррозии оценивают по убыли материала с единицы площади коррозии (например, в  $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$ ) или по скорости проникновения коррозии, т. е. по одностороннему уменьшению толщины нетронутого металла ( $I$ ) (например, в  $\text{мм/год}$ ).

При равномерной коррозии  $I = 8,75 K/\rho$ , где  $\rho$  – плотность металла, в  $\text{г/см}^3$ . При неравномерной и местной коррозии оценивается максимальное проникновение. По ГОСТ 13819-68 установлена десятибалльная шкала общей коррозионной стойкости (табл. 3.2). В особых случаях коррозия может оцениваться и по другим показателям (потеря механической прочности и пластичности, рост электрического сопротивления, уменьшение отражательной способности и т. д.), которые выбираются в соответствии с видом коррозии и назначением изделия или конструкции.

Т а б л и ц а 3.2

**Общая коррозионная стойкость материалов  
по десятибалльной шкале**

| Группа стойкости   | Скорость к коррозии,<br>мм/год | Балл |
|--------------------|--------------------------------|------|
| Совершенно стойкие | Менее 0,001                    | 1    |
| Весьма стойкие     | Свыше 0,001 до 0,005           | 2    |
|                    | Свыше 0,005 до 0,01            | 3    |

**О к о н ч а н и е   т а б л .   3.2**

| Группа стойкости  | Скорость к коррозии,<br>мм/год | Балл |
|-------------------|--------------------------------|------|
| Стойкие           | Свыше 0,01 до 0,05             | 4    |
|                   | Свыше 0,05 до 0,1              | 5    |
| Пониженно стойкие | Свыше 0,1 до 0,5               | 6    |
|                   | Свыше 0,5 до 1,0               | 7    |
| Малостойкие       | Свыше 1,0 до 5,0               | 8    |
|                   | Свыше 5,0 до 10,0              | 9    |
| Нестойкие         | Свыше 10,0                     | 10   |

Устойчивость различных материалов к коррозии приведена в табл. 3.3.

**Т а б л и ц а   3.3**

**Устойчивость материалов к различным видам коррозии  
по десятибалльной шкале**

| Материал                | Атмо-<br>сферная<br>коррозия | Морская<br>коррозия | Химическая коррозия              |                     |      |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|------|
|                         |                              |                     | HCl разбав-<br>ленный<br>раствор | Уксусная<br>кислота | NaOH |
| Нелегированная<br>сталь | 6–7                          | 9                   | 10                               | 8–9                 | 2–3  |
| Хромоникелевые<br>стали | 1                            | 2                   | 4–5                              | 2                   | 2–3  |
| Чугуны                  | 6–7                          | 6–7                 | 10                               | 8–9                 | 2–3  |
| Кремнистые<br>чугуны    | 2                            | 4–5                 | 4–5                              | 1                   | 1    |
| Алюминий                | 2                            | 4–5                 | 8–9                              | 6–7                 | 6–7  |
| Дюралюминий             | 4–5                          | 6–7                 | 8–9                              | 6–7                 | 4–5  |

Окончание табл. 3.3

| Материал                 | Атмосферная<br>коррозия | Морская<br>коррозия | Химическая коррозия              |                     |      |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|------|
|                          |                         |                     | НCl разбав-<br>ленный<br>раствор | Уксусная<br>кислота | NaOH |
| Медь                     | 1                       | 2                   | 6–7                              | 2–3                 | 4–5  |
| Латунь                   | 1                       | 2                   | 4–5                              | 2–3                 | 4–5  |
| Никель                   | 2                       | 8–9                 | 8–9                              | 6–7                 | 2–3  |
| Титан                    | 1                       | 1                   | 4–5                              | 2–3                 | 4–5  |
| Свинец                   | 1                       | 2                   | 6–7                              | 2–3                 | 4–5  |
| Тантал                   | 1                       | 1                   | 2–3                              | 1                   | 2–3  |
| Цинк                     | 2                       | 6–7                 | 10                               | 8–9                 | 4–5  |
| Олово                    | 2                       | 2                   | 6–7                              | 2–3                 | 2–3  |
| ПВХ                      | 6–7                     | 1                   | 2–3                              | 2–3                 | 4–5  |
| Тефлон                   | 1                       | 1                   | 1                                | 4–5                 | 2–3  |
| ПЭ/ПП                    | 1                       | 1                   | 1                                | 4–5                 | 1    |
| Полиуретаны              | 6–7                     | 1                   | 4–5                              | 4–5                 | 6–7  |
| Силиконовый<br>каучук    | 1                       | 1                   | 2–3                              | 2–3                 | 2–3  |
| Боросиликатное<br>стекло | 1                       | 1                   | 1                                | 1                   | 4–5  |
| Графит                   | 1                       | 1                   | 1                                | 1                   | 1    |

## 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Механические свойства материала – это свойства, связанные с реакцией на приложенную нагрузку. Механические свойства металлов определяют диапазон полезности материала и устанавливают предполагаемый срок его службы. Механические свойства также используются для классификации и идентификации материала. Наиболее распространенными характеристиками являются прочность, пластичность, твердость, ударопрочность и вязкость разрушения.

Большинство конструкционных материалов являются анизотропными, что означает, что их свойства изменяются с ориентацией. Изменение свойств может быть связано с направленностью в микроструктуре (текстуре), появившейся в ходе операции формовки или холодной обработки, контролируемых выравниванием армирования волокон и множеством других причин. Механические свойства обычно специфичны для формы продукта, такого как лист, пластина, экструзия, литье,ковка и т. д. Кроме того, обычно видна зависимость механических свойств материала, обусловленных структурой зерна или кристаллов. В таких продуктах, как лист и плита, направление прокатки называется продольным направлением, ширина продукта – поперечным направлением, а толщина – коротким поперечным направлением. Ориентация зерен в стандартных кованых видах металлических изделий обычно совпадает с направлением приложенной силы.

Механические свойства материала не являются постоянными и часто меняются в зависимости от температуры, скорости загрузки и других условий. Например, температуры ниже комнатной обычно вызывают увеличение прочностных свойств металлических сплавов, в то время как пластичность, вязкость разрушения и удлинение обычно уменьшаются. Температуры выше комнатной температуры обычно вызывают снижение прочностных свойств металлических сплавов. Пластичность может увеличиваться или умень-

шаться с увеличением температуры в зависимости от тех же переменных. Следует также отметить, что часто существует значительная изменчивость в значениях, полученных при измерении механических свойств. Типичным случаем является то, что идентичные образцы для испытаний из той же партии материала часто показывают значительно различающиеся результаты. Поэтому для определения механических свойств обычно проводятся многочисленные тесты, и указанные значения могут быть средним значением или рассчитанным статистическим минимальным значением. Кроме того, иногда указывается диапазон значений, чтобы показать изменчивость измерений.

#### **4.1. Механические свойства материалов под действием нагрузки**

Применение силы к объекту называется нагрузкой. Материалы могут подвергаться различным сценариям загрузки, а показатели прочности материала зависят от условий загрузки. Существует пять основных условий нагрузки: натяжение, сжатие, изгиб, сдвиг и кручение. Натяжение – это тип нагрузки, при котором две стороны материала с обеих сторон плоскости раздвигаются или удлиняются. Сжатие является обратной нагрузкой на растяжение и включает сжатие материала с обеих сторон. Нагрузка путем изгиба включает наложение нагрузки таким образом, чтобы материал искривлялся, что приводит к сжатию материала на одной стороне и растягиванию его на другой. Сдвиг – нагрузка, параллельная плоскости, которая заставляет материал с одной стороны плоскости перемещаться по материалу с другой стороны плоскости. Кручение – это применение силы, которая вращает материал в противоположные стороны и вызывает его скручивание.

Если материал подвергается постоянной силе, это называется статической нагрузкой. Если нагрузка материала не является постоянной, а изменяется, она называется динамической или циклической нагрузкой. Способ нагрузки материала сильно влияет на его механические свойства и в значительной степени определяет, каким

образом и при каких значениях приложенной силы образец будет разрушен или деформирован. Также от способа нагрузки во многом зависит появление различных предупреждающих о предстоящем разрушении знаков (растяжения, трещины и т. д.).

Нагрузка вызывает появление стресса и напряжения в материале. Термин «стресс» используется для выражения нагрузки в терминах силы, приложенной к определенной площади поперечного сечения объекта. С точки зрения нагрузки напряжение представляет собой приложенную силу или систему сил, которая стремится деформировать тело. С точки зрения того, что происходит внутри материала, стресс является внутренним распределением сил внутри тела, которое уравнивает и реагирует на нагрузки, приложенные к нему извне. Распределение напряжений может быть или не быть равномерным в зависимости от характера условия нагрузки. Например, брусок, нагруженный чистым натяжением, будет по существу иметь равномерное распределение растягивающего напряжения. Тем не менее брусок, нагруженный в изгибе, будет иметь распределение напряжений, которое изменяется с расстоянием, перпендикулярным к нормальной оси.

Упрощенная модель представляет стресс как векторную величину, что применимо для многих инженерных расчетов и определения свойств материала. Вектор относится к величинам, которые имеют «значение» и «направление». Например, напряжение в аксиально нагруженном стержне равно приложенной силе, деленной на площадь поперечного сечения стержня.

Следует отметить, что напряжения в большинстве двумерных или трехмерных твердых тел на самом деле более сложны и требуют более детального определения. Внутренняя сила, действующая на малую площадь плоскости, может быть разделена на три составляющие: одну нормаль к плоскости и две параллельные плоскости. Нормальная составляющая силы, деленная на площадь, дает нормальное напряжение, а компоненты параллельной силы, разделенные областью, дают напряжение сдвига. Эти напряжения являются средними напряжениями, поскольку площадь конечна, но когда площадь стремится к нулю, напряжения становятся стрессами в точке.

Так как напряжения определяются по отношению к плоскости, проходящей через рассматриваемую точку, а число таких плоскостей бесконечно, в точке появляется бесконечный набор напряжений.

К счастью, можно доказать, что напряжения на любой плоскости можно вычислить из напряжений на трех ортогональных плоскостях, проходящих через точку. Поскольку каждая плоскость имеет три напряжения, тензор напряжений имеет девять компонент напряжений, которые полностью описывают состояние напряжения в точке. Сложность описания нагруженных материалов приводит к тому, что для моделирования подобных явлений используются специальные компьютерные программы.

Деформация – это реакция материала на приложенное напряжение. Когда материал нагружен силой, сила создает напряжение, которое затем приводит к деформации материала. Инженерная деформация определяется как величина деформации в направлении приложенной силы, деленная на начальную длину материала. Это ведет к безразмерному числу, хотя его часто оставляют в форме без упрощения, например, дюймы на дюйм или метры на метр. Например, деформация в стержне, подвергнутом растяжению, – это величина удлинения или изменения длины, деленная на ее первоначальную длину. Как и в случае напряжения, распределение деформаций может быть или не быть однородным в сложном структурном элементе в зависимости от характера условия нагрузки.

Если напряжение невелико, материал может растягиваться обратимо, и после того, как напряжение будет снято, он вернется к первоначальному размеру. Это называется упругой деформацией, потому что, как и упругая нить, материал возвращается в свое исходное состояние. Упругая деформация возникает только тогда, когда напряжение в материале ниже критического, называемого пределом текучести. Если материал загружается выше предела текучести, он остается в деформированном состоянии после снятия нагрузки. Это называется пластической деформацией.

Характеристикой механических свойств материалов являются их предельные свойства. Предельные свойства показывают, как материал будет реагировать на силы, применяемые при растяжении.



Испытание на растяжение является фундаментальным механическим тестом, когда тщательно подготовленный образец нагружается контролируемым образом. При этом строится зависимость удлинения образца от приложенной нагрузки в некотором интервале значений. Испытания на растяжение используются для определения модуля упругости, предела упругости, удлинения, пропорционального предела, уменьшения площади сечения образца, предела прочности при растяжении, предела текучести и других свойств растяжения.

Основным результатом испытания на растяжение является кривая зависимости нагрузки от удлинения, которая затем преобразуется в кривую напряжений и деформаций (см. рисунок). Поскольку инженерное напряжение получают путем деления нагрузки и удлинения на постоянные значения, обусловленные геометрией образца, кривая удлинения–нагрузки будет иметь ту же форму, что и кривая инженерного напряжения–деформации. Каждый исследуемый материал имеет свою собственную уникальную кривую напряжения и деформации. На рисунке приведена типичная кривая зависимости напряжения от деформации. Если используется истинное напряжение, основанное на фактической площади поперечного сечения образца, установлено, что кривая напряжения и деформации непрерывно возрастает до разрушения.



Кривая «напряжение–деформация»

Как видно из рисунка, напряжение и деформация первоначально возрастают согласно линейной зависимости. Это линейно-эластичная часть кривой, которая указывает на отсутствие пластической деформации. В этой области кривой, когда стресс уменьшается, материал возвращается к своей первоначальной форме. В этой линейной области линия подчиняется соотношению, определенному как закон Гука, где отношение напряжения к деформации является константой. Наклон линии в этой области, где напряжение пропорционально деформации, называется модулем упругости или модулем Юнга.

Модуль упругости ( $E$ ) определяет свойства материала, когда он подвергается стрессу, деформируется и затем возвращается к своей первоначальной форме после снятия напряжения. Это показатель жесткости данного материала. Чтобы вычислить модуль упругости, необходимо разделить напряжение на деформацию материала. Поскольку деформация является безразмерной величиной, модуль будет измеряться в тех же единицах, что и напряжение, например, в МПа. Модуль упругости относится к ситуации растяжения компонента без пластической деформации. Этот модуль представляет интерес, когда необходимо вычислить, насколько стержень или проволока растягивается под растягивающей нагрузкой.

Существует несколько различных типов модулей в зависимости от того, как материал растягивается, согнут ли он или искажен каким-либо иным образом. Когда компонент подвергается чистому сдвигу, как, например, цилиндрический стержень при кручении, модуль сдвига описывает линейно-упругую связь напряжение–деформация.

Осевая деформация всегда сопровождается поперечными деформациями противоположного знака в двух направлениях, взаимно перпендикулярных осевой деформации. Деформации, возникающие в результате увеличения длины, обозначаются как положительные (+), а те, которые приводят к уменьшению длины, обозначаются как отрицательные (–). Отношение Пуассона определяется как отрицательное отношение поперечного напряжения к осевой деформации для одноосного напряженного состояния:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}}.$$

Отношение Пуассона иногда также определяется как отношение абсолютных значений поперечной и осевой деформации. Это соотношение является безразмерным, поскольку обе деформации имеют одни единицы измерения. Для напряжений в пределах диапазона упругости это отношение является приблизительно постоянным. Для идеально изотропного эластичного материала коэффициент Пуассона равен 0,25, но для большинства материалов значение лежит в диапазоне от 0,28 до 0,33. Обычно для сталей коэффициент Пуассона будет иметь значение около 0,3. Это означает, что при наличии деформации на 1 см в направлении приложения напряжения деформация, перпендикулярная направлению, в котором применяется сила, будет составлять 0,3 см.

В пластичных материалах в какой-то момент кривая напряжения и деформации отклоняется от линейного отношения и закон Гука больше не применяется, поскольку деформация увеличивается быстрее, чем напряжение. С этого момента в испытании на растяжение в образце возникает некоторая постоянная деформация, и, как говорят, материал пластически реагирует на любое дальнейшее увеличение нагрузки или напряжения. Когда груз будет удален, материал не вернется в исходное состояние. В хрупких материалах, таких как стекло, керамика, чугун, практически не происходит пластической деформации и материал разрушается вблизи конца линейно-эластичной части кривой.

В большинстве материалов происходит постепенный переход от упругого к пластическому поведению, и точку, с которой начинается пластическая деформация, определить сложно. Поэтому в зависимости от чувствительности измерений деформации и предполагаемого назначения данных применяются различные критерии перехода от одной области к другой. Для большинства приложений проектирования используется предел текучести. Предел текучести определяется как напряжение, необходимое для получения небольшого количества пластической деформации. Стойкость к сдвигу – это напряжение, соответствующее пересечению кривой напряжения и деформации и линии, параллельной упругой части кривой, смещенной на заданную деформацию (при этом смещение обычно составляет 0,2 % для металлов и 2 % для пластмасс).

Чтобы определить предел текучести с использованием этого смещения, находят точку на оси деформации (по оси  $x$ ) 0,002, а затем рисуют линию, параллельную линии напряжений. Данная линия будет пересекать линию напряжений, и это пересечение определяется как предел текучести со смещением 0,2 %. Хороший способ определить предел текучести заключается в следующем: образец нагружают до 0,2 %-го предела текучести, затем нагрузку снимают, образец должен стать на 0,2 % длиннее, чем до испытания. Несмотря на то что предел текучести предназначен для того, чтобы с малой погрешностью определить точку, в которой материал становится постоянно деформированным, относительное удлинение 0,2 % считается возможным допуском для облегчения определения предела текучести. Истинный предел упругости является очень низким значением и связан с движением нескольких сотен дислокаций. Для измерения деформации требуются измерения микродеформации порядка  $2 \cdot 10^{-6}$  см/см.

Для некоторых материалов, таких как серый чугун или мягкая медь, практически не характерно линейно-упругое поведение. Для этих материалов обычной практикой является определение предела текучести в качестве напряжения, необходимого для получения некоторого общего количества деформации.

Пропорциональный предел – это наибольшее напряжение, при котором напряжение прямо пропорционально деформации. Это достигается путем наблюдения за отклонением кривой напряжения–деформации от линейной части.

Эластичный предел – наибольшее напряжение, которое материал может выдерживать без какого-либо измеримого постоянного напряжения, оставшегося при полном освобождении нагрузки. Он определяется с помощью многоэтапной процедуры нагрузки-разгрузки. При чувствительности измерений деформаций, обычно используемых в инженерных исследованиях ( $10^{-4}$  см/см), предел упругости превышает предел пропорциональности. С увеличением чувствительности измерения деформации значение предела упругости уменьшается до тех пор, пока оно в конечном итоге не станет равным истинному пределу упругости, определяемому по измерениям микродеформации.

Предел текучести – напряжение, необходимое для получения небольшого количества пластической деформации. Величина предела текучести, полученная методом смещения, обычно используется в технике, поскольку позволяет избежать практических трудностей измерения предела упругости или пропорционального предела.

Конечная прочность на растяжение или предел прочности (ПП) – это максимальный уровень технического напряжения, достигнутый в испытании на растяжение. Конечная прочность определяет прочность материала, а именно его способность выдерживать внешние силы без разрушения. В хрупких материалах ПП будет находиться в конце линейно-эластичной части кривой «напряжение–деформация» или вблизи предела упругости; в пластичных материалах – вне линейно-эластичной части кривой «напряжение–деформация», в области пластичной деформации.

На кривой напряжений и деформаций предел прочности является самой высокой точкой, где касательная перпендикулярна оси  $X$ . Поскольку предел прочности основан на инженерном напряжении, он часто отличается от прочности на разрыв. В пластичных материалах происходит деформационное упрочнение и напряжение будет продолжать увеличиваться до тех пор, пока не возникнет трещина, но кривая инженерного напряжения-деформации может показать снижение уровня напряжения до разрушения. Это связано с тем, что технический стресс основывается на исходной площади поперечного сечения и не учитывает шейку, которая обычно встречается в образце. Поэтому предел прочности может не полностью соответствовать наивысшему уровню стресса, который может поддерживать материал, но в любом случае эта величина обычно не используется при проектировании готовых изделий. Однако, поскольку предел прочности легко найти и достаточно легко воспроизвести, его определение может быть полезным для выбора подходящего материала и целей контроля качества. С другой стороны, для хрупких материалов расчет конструкции готового изделия может быть основан на прочности на растяжение.

Пластичность материала является мерой того, в какой степени материал будет деформироваться до разрушения. Количественные показатели пластичности являются важным фактором при рас-

смотрении операций формовки, таких как прокатка и экструзия. Они также указывают на то, как видимые перегрузки могут привести к нанесению ущерба, вплоть до механического разрушения. Пластичность также используется в качестве параметра контроля качества для оценки уровня загрязнений и подлежащей обработки материала.

Обычными мерами пластичности являются инженерные деформации при разрыве (обычно называемые удлинениями) и уменьшение площади при разрушении. Оба этих свойства определяют путем соединения образца после разрушения и измерения изменения длины и площади поперечного сечения. Удлинение представляет собой изменение осевой длины, деленное на первоначальную длину образца или части образца, и выражается в процентах. Поскольку значительная часть пластической деформации будет сконцентрирована в области шейки растягивающего образца, значение удлинения будет зависеть от целого ряда факторов, трудно поддающихся учету. Один из способов избежать погрешностей измерения, вызванных деформациями шейки образца, – это определить удлинения до точки, в которой начинается шейка. Однако некоторые кривые напряжений деформации часто довольно плоские вблизи максимальной нагрузки и трудно точно установить напряжение, при котором формируется шейка.

Уменьшение площади – это изменение площади поперечного сечения, разделенное на исходную площадь поперечного сечения. Изменение измеряется в области шейки образца. Как и удлинение, оно обычно выражается в процентах.

Ранее говорилось, что напряжение является лишь одним из способов нагрузки материала. Другие способы включают сжатие, изгиб, сдвиг и кручение. Существует ряд стандартных тестов, которые были установлены для характеристики того, как материал работает в условиях загрузки, отличных от удлинения. Таким образом, построение кривой напряжений и деформаций позволяет определить основные механические свойства материала и его способность противостоять механической нагрузке. Эти данные позволяют уверенно выбирать материалы для конструирования технологического оборудования в биотехнологии.

В табл. 4.1 приведены основные механические свойства металлов, а в табл. 4.2 – полимерных материалов.

Таблица 4.1

## Механические свойства металлов и сплавов

| Металлы и сплавы                                | Состояние                     | Предел<br>текучести,<br>МПа | Предел<br>прочности,<br>на растяжение,<br>МПа | Удлине-<br>ние, % | Ударная<br>вязкость,<br>МДж/м <sup>2</sup> |
|---|-------------------------------|-----------------------------|---|-------------------|--|
| Железо чистое                                   | После литья                   | 125                         | 250–300                                       | 25–55             | 20   |
| Малоуглеродистая сталь<br>(0,2 % С)             | Горячекатаная                 | 300                         | 450   | 35                | 28   |
| Среднеуглеродистая сталь<br>(0,4 % С, 0,5 % Mn) | Упрочненная и отпущенная      | 450                         | 700   | 21                | 25   |
| Высокопрочная сталь                             | Упрочненная и отпущенная      | 1750                        | 2300  | 11                | 35   |
| Серый чугун                                     | После литья                   | –                           | 175–300                                       | 0,4               | 10   |
| Алюминий технически чистый                      | Отожженный                    | 35                          | 90  | 45                | 12   |
|   | Деформационно-<br>упрочненный | 150                         | 170   | 15                | 15   |
| Магний  | Катаный                       | 20–60                       | 170–200                                       | 15                | 10   |
| Дюралюминий                                     | Упрочненный старением         | 360                         | 500   | 13                | 12   |
| Медь  | Тянутая                       | 60–80                       | 220   | 60                | 30   |
| Латунь листовая<br>(70 % Cu, 30 % Zn)           | Полностью отожженная          | 80                          | 300   | 66                | 32   |

Окончание табл. 4.1

| Металлы и сплавы                      | Состояние                     | Предел<br>текучести,<br>МПа | Предел<br>прочности,<br>на растяжение,<br>МПа | Удлине-<br>ние, % | Ударная<br>вязкость,<br>МДж/м <sup>2</sup> |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|-------------------|--|
| Латунь листовая<br>(70 % Cu, 30 % Zn) | Деформационно-<br>упрочненная | 500                         | 530   | 8                 | 27   |
| Вольфрам, проволока                   | Тянутая до диаметра 0,63 мм   | 2200                        | 2300  | 2,5               | 46   |
| Никель                                | Горячекатаный                 | 120                         | 400–500                                       | 40                | 34   |
| Олово белое                           | После литья                   | –                           | 20–40   | 40                | 17   |
| Свинец                                | После литья                   | 6                           | 12  | 30                | 13   |
| Титан                                 | Катаный                       | 440                         | 600   | 28                | 45   |
| Цинк                                  | После литья                   | 90–100                      | 110–150                                       | 5–20              | 20   |
| Цирконий                              | Катаный                       | –                           | 950   | 10                | 26   |



## Механические свойства пластмасс

| Тип пластмассы                           | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел прочности при изгибе, МПа | Модуль Юнга, ГПа | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup> |
|--|--------------------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Асбестостолит                            | 65                                   | 100                              | 15               | —                          | 3                                    |
| Винипласт                                | 50                                   | 110                              | 4,0              | 30                         | 15                                   |
| Гетинакс                                 | 160                                  | 140                              | 1,5              | —                          | 1,4                                  |
| Дифлон                                   | 70                                   | 105                              | —                | 50                         | 13                                   |
| Капрон                                   | 55                                   | 95                               | 1,0              | 100                        | 11                                   |
| Капрон стеклонаполненный                 | 130                                  | 200                              | 6,5              | 2                          | 2,5                                  |
| Пенопласт ПХВ-1                          | 4,5                                  | 4                                | 0,18             | 6                          | 0,15                                 |
| Полиамид П-68                            | 50                                   | 80                               | 1,5              | 100                        | 15                                   |
| Полиамид, наполненный тальком и графитом | 60                                   | 80                               | 1,15             | 100                        | 10                                   |
| Полипропилен                             | 32                                   | 75                               | 1,15             | 600                        | —                                    |
| Полистирол                               | 35                                   | 100                              | 2,5              | 1,5                        | 2                                    |
| Политетрафторэтилен (Фторопласт-4)       | 20                                   | 12,5                             | 0,45             | 300                        | 10                                   |
| Политетрахлорэтилен (Фторопласт-3)       | 37                                   | 70                               | 1,15             | 30                         | 2–16                                 |

О к о н ч а н и е   т а б л . 4.2

| Тип платмасы   | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел прочности при изгибе, МПа | Модуль Юнга, ГПа | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup> |
|--|--------------------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Полиуретан   | 55                                   | 75                               | 0,01             | 55                         | 1,1                                  |
| Полиэтилен высокого давления   | 14                                   | 15                               | 0,2              | 150                        | –                                    |
| Полиэтилен низкого давления  | 22–32                                | 20–35                            | 0,7              | 200                        | –                                    |
| Стекло органическое:<br>– неориентированное<br>– ориентированное марок СОЛ, СТ1<br>– ориентированное марок 2-55, Т2-55 | 75<br>80<br>105                      | 105<br>105<br>150                | 3<br>3<br>4      | 4<br>20<br>3               | 1,3<br>3<br>3                        |
| Стекловолокно АГ   | 405                                  | 410                              | 22               | –                          | 15                                   |
| Стеклопластик СВМ  | 460                                  | 460                              | 35               | –                          | 15                                   |
| Стеклотекстолит  | 320                                  | 150                              | 20               | 0,8                        | 8                                    |
| Текстолит ПТ   | 85                                   | 140                              | 10               | 1                          | 3,5                                  |
| Этрол:<br>– ацетицеллюлозный<br>– нитроцеллюлозный   | 55<br>30                             | 50<br>35                         | 2,25<br>2,3      | 7<br>25–50                 | 2<br>0,6                             |

Для керамических материалов и стекла трудно привести корректные данные по механическим свойствам, так как на них очень большое влияние оказывает технология изготовления изделия. Два образца, сделанных из одного и того же материала, могут иметь совершенно разную прочность. Например, стекло – довольно прочный материал, однако его прочность зависит от состава и метода обработки. Стекло обладает сравнительно высоким пределом прочности при сжатии и низким при ударе. Прочность стекла зависит от состояния его поверхности, химического состава, степени отжига, однородности, состава и температуры окружающей среды. Предел прочности на сжатие обычных стекол варьируется в широких пределах и составляет от 500 до 2000 МПа (у боросиликатного примерно 1800 МПа), при ударном изгибе 10–25 МПа. Из механических свойств стекол прочность на растяжение является одним из важнейших. Объясняется это тем, что стекло работает на растяжение хуже, чем на сжатие. Предел прочности на растяжение колеблется в пределах от 35 до 100 МПа, т. е. в 15–20 раз меньше, чем на сжатие. В то же время теоретическая прочность стекол намного превышает эти значения. Так, вычисленная по формуле Юнга теоретическая прочность стекла  $E = 7000$  МПа.

Основной причиной резкого различия теоретической и реальной прочности стекла является наличие трещин, царапин и неоднородностей на его поверхности и в объеме, так как при изготовлении стеклоизделий невозможно сохранить их поверхность в бездефектном состоянии, прочность, вне зависимости от химического состава и технологии производства. В то же время операция закаливания стекла повышает его прочность в 3–4 раза, причем прочность зависит от степени отжига. С увеличением остаточных напряжений в стекле в 1,5–2 раза сопротивление изгибу уменьшается на 9–12 %. На прочность стекла оказывает влияние и его химический состав. Так, окислы  $\text{CaO}$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$  значительно повышают прочность,  $\text{PbO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – в меньшей степени,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZnO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  почти не изменяют ее.

В области температур ниже температуры плавления стекло разрушается от механического воздействия без заметной пласти-

ческой деформации и поэтому относится к идеально хрупким материалам. Данное свойство может быть отражено удельной ударной вязкостью. Для силикатных стекол ударная вязкость составляет от 1,5 до 2 кН/м, что в 100 раз уступает железу. Это свойство является основным ограничением на изготовление стеклянного оборудования больших размеров.

## 4.2. Ударная прочность материалов

Способность металла деформироваться пластически и поглощать энергию в процессе деформации до разрушения называется вязкостью. Основное внимание в этом определении следует уделить способности поглощать энергию до разрушения. Необходимо отметить, что пластичность – это мера того, насколько тот или иной материал деформируется пластически до разрушения. Однако только тот факт, что материал пластичный, не делает его жестким. Условием ударной вязкости является хорошее сочетание прочности и пластичности. Материал с высокой прочностью и высокой пластичностью будет иметь большую ударную вязкость, чем материал с низкой прочностью и высокой пластичностью. Поэтому одним из способов измерения ударной вязкости является вычисление площади под кривой деформации напряжения из теста на растяжение. Это значение называется материальной прочностью и имеет различные единицы измерения, отражающие поглощение энергии определенным объемом материала. Значение твердости материала соответствует медленному поглощению энергии материалом.

Существует несколько факторов, которые оказывают глубокое влияние на прочность материала:

- скорость деформации (скорость загрузки);
- температура;
- эффект надреза, т. е. каким образом материал реагирует на появление надреза на испытательном образце и насколько легко в нем развиваются трещины.

Металл может обладать удовлетворительной ударной вязкостью при статических нагрузках, но может быть легко разрушен при ди-

налических нагрузках или однократном интенсивном воздействии. Как правило, пластичность и, следовательно, вязкость снижаются по мере увеличения скорости нагрузки. Температура является второй переменной, которая оказывает большое влияние на прочность образца. По мере понижения температуры пластичность и вязкость также уменьшаются. Третья переменная называется эффектом надреза, что связано с распределением стресса. Материал может проявлять хорошую ударную вязкость, когда приложенное напряжение является одноосным, но когда возникает многоосное напряженное состояние из-за наличия надреза, материал может не выдержать одновременной упругой и пластической деформации в разных направлениях.

Основным отличием ударных нагрузок от испытаний на растяжение-сжатие или изгиб является гораздо более высокая скорость выделения энергии. Таким образом, ударная вязкость характеризует способность материала к быстрому поглощению энергии. Обычно оценивается работа до разрушения или разрыва испытываемого образца при ударной нагрузке, отнесенной к площади его сечения в месте приложения нагрузки, которая выражается в Дж/см<sup>2</sup> или в кДж/м<sup>2</sup>. Ударную вязкость обозначают KCV, KCU, KCT, где KC – символ ударной вязкости, а третий символ – вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T).

Существует несколько стандартных типов испытаний на ударную вязкость, которые генерируют данные для конкретных условий нагрузки или учитывают различные режимы работы готовых изделий. Имеющиеся лабораторные методы отличаются:

- по способу закрепления образца на испытательном стенде;
- способу приложения нагрузки, например, падающая гиря, маятник, молот;
- наличию или отсутствию надреза в месте приложения удара.

Для испытания без надреза выбирается лист материала с равной толщиной по всей площади. При проведении испытания с надрезом на поверхности листа продельвается канавка, как правило, на стороне, обратной по отношению к месту удара, на всю ширину (длину) образца, глубиной на 1/2 толщины. Ударная вязкость при ис-

питании без надреза может превышать результат испытаний с надрезом более чем на порядок.

Среди распространенных методов испытаний на ударопрочность следует отметить:

- испытания по Шарпи;
- испытания по Гарднеру;
- испытания по Изоду.

В качестве примера можно привести испытания по Шарпи, при которых призматический образец, лежащий на двух опорах, подвергается удару маятникового молотка, причем линия удара находится посередине между опорами и непосредственно напротив надреза у образцов с надрезом. Для металлов оценивается поглощенная энергия удара в Дж, а для пластмасс – ударная вязкость (энергия, отнесенная к площади поперечного сечения в месте удара) в Дж/м<sup>2</sup>. Поскольку значения энергии удара для разных материалов зависят от температуры, то испытания проводят при заданных температурах. Испытание на ударный изгиб по Шарпи регламентировано ГОСТ Р ИСО 148-1-2013 (для металлов) и ГОСТ 4647-80 (для пластмасс).

### **4.3. Твердость материалов**

Твердость – это сопротивление материала к локализованной деформации. Этот термин может применяться к деформации от углублений, царапин, резки или изгиба. В металлах, керамике и большинстве полимеров рассматриваемая деформация представляет собой пластическую деформацию поверхности. Для эластомеров и некоторых полимеров твердость определяется при сопротивлении упругой деформации поверхности. Отсутствие фундаментального определения указывает на то, что твердость является не основным свойством материала, а скорее составным, включающим множество факторов (предел текучести, упрочнение, истинная прочность на растяжение, модуль упругости и др.). Измерения твердости широко используются для контроля качества материалов, поскольку они проводятся быстро и считаются неразрушающими

испытаниями, когда метки или углубления, полученные в результате испытаний, находятся в зонах с низким напряжением.

Существует множество методов, используемых для определения твердости вещества. Ниже приведены некоторые, наиболее распространенные.

Один из самых старых способов измерения твердости был разработан немецким минералогом Фридрихом Моосом в 1812 г. При испытании на твердость Мооса необходимо осмотреть, не царапана ли поверхность материала веществом известной или определенной твердости. Чтобы придать численные значения этому физическому свойству, минералы ранжируются по шкале Мооса, которая состоит из 10 минералов, которым были даны произвольные значения твердости. Испытание на твердость по Моосу, значительно облегчающее идентификацию минералов в полевых условиях, в то же время не подходит для точного измерения твердости промышленных материалов, таких как сталь или керамика. Для технических материалов на протяжении многих лет были разработаны различные инструменты для определения количественных показателей твердости. С помощью большинства из них осуществляют нагрузку на образец и измеряют глубину или размер полученного дефекта. Твердость может быть измерена на макро-, микро- или даже на наномасштабном уровне.

Наиболее распространенным на сегодняшний день методом испытаний на твердость технических материалов является измерение твердости по Бринеллю. Шведский инженер, металлург, доктор Дж. А. Бринелль изобрел свой тест в 1900 г. В тесте Бринелля используется настольная машина для применения указанной нагрузки с помощью закаленной сферы заданного диаметра. Твердость по Бринеллю, или просто число Бринелля, получается путем деления используемой нагрузки (в кг) на измеренную площадь поверхности углубления (в мм<sup>2</sup>), оставшуюся на испытательной поверхности. Тест Бринелля часто используется для определения твердости металлических заготовок и отливок с крупными зернистыми структурами. Он обеспечивает измерение на довольно большой площади, на которую меньше влияет структура зернистости этих материалов, чем другие похожие тесты.

Широкий спектр материалов может быть протестирован с использованием теста Бринелля при варьировании тестовой нагрузки и размера шарика. В США испытания по Бринеллю обычно выполняются на чугунных и стальных отливках с использованием испытательной силы 3000 кг и шарика диаметром 10 мм. Нагрузка 1500 кг обычно используется для алюминиевых отливок. Медь, латунь и тонкий материал часто тестируются с использованием испытательной силы 500 кг и шарика диаметром 10 или 5 мм. В Европе тестирование по Бринеллю выполняется с использованием гораздо более широкого диапазона сил и размеров шариков; на небольших деталях тестирование обычно проводится с использованием карбидного шарика диаметром 1 мм и испытательной силы до 1 кг. Эти тесты с низкой нагрузкой обычно называются облегченными исследованиями по Бринеллю. Условия испытаний следует сообщать вместе с номером твердости по Бринеллю. Значение, обозначенное как 60 HB 10/1500/30, означает, что твердость 60 была получена с использованием шарика диаметром 10 мм с нагрузкой 1500 кг, применяемой в течение 30 с.

Другим популярным тестом на прочность материалов является испытание Роквелла. При этом используется машина для нанесения определенной нагрузки, а затем измеряется глубина полученного отпечатка. В качестве испытательного инструмента может быть либо стальной шарик определенного диаметра, либо сферический конус с алмазным наконечником с углом наклона 120°, радиусом наконечника 0,2 мм. Сначала применяется незначительная нагрузка 10 кг, что приводит к небольшому начальному проникновению и позволяет устранить последствия каких-либо неровностей поверхности. Затем циферблат устанавливается на ноль и применяется основная нагрузка. При снятии основной нагрузки считывание глубины производится в то время, пока незначительная нагрузка все еще действует. Затем число твердости можно считывать непосредственно со шкалы. Используемый инструмент и тестовая нагрузка определяют используемую шкалу твердости (А, В, С и т. д.).

Для мягких материалов, таких как медные сплавы, мягкая сталь и алюминиевые сплавы, используется стальной шарик диаметром



1/16 дюйма со 100-килограммовой нагрузкой, а твердость считается по шкале В. При испытаниях твердых материалов, таких как твердый чугун и многие стальные сплавы, используется алмазный конус на 120 ° с нагрузкой до 150 кг, а твердость считается по шкале С. Существует несколько шкал Роквелла, отличных от шкалы В и С, которые называются общими масштабами. Правильно зарегистрированное значение Роквелла будет иметь число твердости, за которым следуют «HR» (Hardness Rockwell) и буква масштаба. Например, 50 HRB означает, что материал имеет твердость, равную 50 по шкале В.

Классификация шкал измерений по Роквеллу:

А – цементированные карбиды, тонкая сталь и мелкодисперсная закаленная сталь;

В – мягкие стали, алюминиевые сплавы, ковкое железо и т. д.;

С – сталь, жесткие литые чугуны, перлитное ковкое железо, титан и другие материалы, более жесткие, чем В 100;

Д – сталь, среднетвердые закаленные стали и перлитное ковкое железо;

Е – каменный сплав железа, алюминия и магния, подшипниковые металлы;

Ф – медные сплавы, тонкие мягкие листовые металлы;

Г – фосфорная бронза, бериллиевая медь, ковкий чугун;

Н – алюминий, цинк, свинец;

К, L, М, Р, R, S, V – обрезаемые металлы и другие очень мягкие или тонкие материалы, включая пластмассы.

Тестер поверхностной твердости по Роквеллу используется для испытания тонких материалов, слегка цементированных стальных поверхностей или деталей, которые могут изгибаться или раздавливаться в условиях регулярного испытания. Этот тестер использует те же инструменты, что и стандартный тестер Роквелла, но нагрузки уменьшаются. Сначала используется незначительная нагрузка в 3 кг, а основная нагрузка составляет 15 или 45 кг в зависимости от используемого инструмента. Для обозначения подобных тестов к аббревиатуре твердости добавляется «Т», что означает тонкое листовое испытание. Примером поверхностной твердости Роквелла

является 23 HR15T, что указывает на поверхностную твердость, равную 23 с нагрузкой 15 кг с использованием стального шарика.

Тесты твердости по Виккерсу и Кнупу – это модификация теста Бринелля, они используются для измерения твердости тонкопленочных покрытий или поверхностной твердости корпусных деталей. При этих тестах небольшая алмазная пирамида прижимается к образцу под нагрузками, которые намного меньше, чем те, которые применялись в тесте Бринелля. Разница между тестами Виккерса и Кнупа заключается в форме алмазной пирамиды. В тесте Виккерса используется квадратный пирамидальный инструмент, который вызывает растрескивание хрупких материалов. Поэтому был разработан тест Кнупа с использованием ромбического (диагональное отношение 7.114 : 1) пирамидального инструмента, который производит более длинные, но более мелкие углубления.

При такой же нагрузке следы от теста Кнупа примерно в 2,8 раза больше, чем от теста Виккерса. В данных тестах применяется нагрузка от 10 до 1000 г. Эта нагрузка создает небольшую деформацию материала, которая должна измеряться под микроскопом. Измерения для твердых покрытий, таких как TiN, должны производиться при очень большом увеличении (до 1000х), поскольку вмятины очень малы. При этом поверхность материала обычно должна быть хорошо отполирована. Диагонали отпечатка измеряются, и эти значения используются для получения номера твердости (VHN), как правило, из таблицы поиска или диаграммы. Тест Виккерса можно использовать для характеристики очень твердых материалов, но твердость измеряется в очень узкой области.

Значения тестов выражаются как 2500 HK25 (или HV25): 2500 – твердость Кнупа при нагрузке 25 г. Значения твердости Виккерса и Кнупа немного отличаются, но для твердых покрытий значения достаточно близки к погрешности измерения и могут быть взаимозаменяемыми.

Другим видом теста на прочность является испытание на склероскопе. Склероскопия – тест, который включает падение молотка с алмазным наконечником внутри стеклянной трубки под действием собственного веса с фиксированной высоты на образец для испы-

таний. Высота отскока молотка измеряется в градуированной шкале. Масштаб отскока выбирается произвольно и состоит из шкалы, разделенной на 100 частей, верхняя граница которой представляет собой средний отскок от закаленной высокоуглеродистой стали. Масштаб измерений – выше 100, чтобы включить металлы с большей твердостью. Склероскоп измеряет твердость с точки зрения эластичности материала, а твердость зависит от высоты, до которой поднимается молоток; чем тверже материал, тем выше отскок.

Метод испытания на твердость с помощью отскока имеет множество вариантов исполнения. На рынке существуют электронные инструменты, с помощью которых измеряют потерю энергии ударного тела. В этих приборах обычно используется пружина для ускорения массивной сферы из твердосплавного карбида вольфрама в направлении поверхности испытуемого объекта. Когда масса контактирует с поверхностью, она обладает определенной кинетической энергией, а удар создает на поверхности углубление (пластическая деформация), которое берет часть этой энергии ударного тела. Ударное тело будет терять больше энергии и скорость отскока будет меньше, когда более крупная вмятина будет оставлена на более мягком материале. Измеряются скорости ударного тела до и после соприкосновения, а потерю скорости пересчитывают в единицах Бринелля, Роквелла или других общепринятых значений твердости.

Еще один прибор, широко используемый для измерения твердости, называется дюрометром. Он обычно используется для измерения твердости резины, эластомеров и мягких пластмасс, таких как полипропилен, фторполимеры и поливинилхлорид. Прибор был разработан Альбертом Шором, поэтому данный метод измерения твердости носит его имя. Дюрометр использует калиброванную пружину для приложения определенного давления на вдавливающий инструмент. Ножка дюрометра может быть либо конусной, либо сферической, при этом указательное устройство измеряет глубину вдавливания. Существуют различные модели дюрометров, наиболее популярными тестерами являются модель А, используемая для измерения более мягких материалов, и модель D для более твердых материалов.

Близким к методу Шора является определение твердости по Барколу. Оно заключается в измерении сопротивления материала проникновению твердосплавного стержня под пружинной нагрузкой. Образец помещают под твердомер Баркола и равномерно нагружают до тех пор, пока значение нагрузки не достигнет максимума. Метод испытания на твердость по Барколу используется для определения твердости как усиленных, так и неармированных жестких пластмасс и определения степени отверждения смол и пластмасс. Твердость некоторых материалов приведена в табл. 4.3 и 4.4.

Т а б л и ц а 4.3

**Сравнительная твердость металлов по Моосу**

| Материал | Твердость |
|----------|-----------|
| Алюминий | До 2,9    |
| Висмут   | 2,5       |
| Железо   | Около 4,5 |
| Золото   | 2,5       |
| Иридий   | 6,5       |
| Кадмий   | 2,0       |
| Калий    | 0,5       |
| Кобальт  | 5,5       |
| Кремний  | 7,0       |
| Литий    | 0,6       |
| Магний   | 2,0       |
| Марганец | 5,0       |
| Медь     | 3,0       |
| Натрий   | 0,4       |
| Никель   | 5,8       |
| Олово    | 1,8       |

Окончание табл. 4.3

| Материал | Твердость |
|----------|-----------|
| Палладий | 4,8       |
| Платина  | 4,3       |
| Свинец   | 1,5       |
| Серебро  | 2,7       |
| Хром     | 9,0       |
| Цинк     | 2,5       |

Таблица 4.4

**Твердость некоторых материалов по Бринеллю и Роквеллу**

| Материал                    | Твердость по Бринеллю | Твердость по Роквеллу |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Мягкое дерево               | 1,6 HBS 10/100        | —                     |
| Твердое дерево              | 2,6–7,0 HBS 10/100    | —                     |
| Олово                       | 5 HB                  | HR2                   |
| Полиэтилен низкого давления | 4,5–5,8 HB            | —                     |
| Свинец                      | 6 HB                  | HR4                   |
| Полистирол                  | 15 HB                 | HR6                   |
| Кадмий                      | 20 HB                 | —                     |
| Магний                      | 25 HB                 | HR10                  |
| Алюминий                    | 28 HB                 | HR12                  |
| Медь                        | 35 HB                 | HR15                  |
| Цинк                        | 40 HB                 | HR19                  |
| Железо чистое               | 50 HB                 | HR25                  |
| Дюралюминий                 | 70 HB                 | HR30                  |

О к о н ч а н и е   т а б л .   4.4

| Материал               | Твердость<br>по Бринеллю | Твердость<br>по Роквеллу |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Никель                 | 80 HB                    | HR33                     |
| Цирконий               | 85 HB                    | —                        |
| Мягкая сталь           | 120 HB                   | HR35                     |
| Кобальт                | 125 HB                   | HR35                     |
| Бериллий               | 140 HB                   | HR45                     |
| Марганец               | 210 HB                   | HR50                     |
| Хром                   | 220 HB                   | HR65                     |
| Титан                  | 230 HB                   | HR70                     |
| Кремний                | 240 HB                   | —                        |
| Нержавеющая сталь      | 250 HB                   | HR75                     |
| Ниобий                 | 260 HB                   | HR80                     |
| Вольфрам               | 350 HB                   | HR110                    |
| Стекло                 | 500 HB                   | HR150                    |
| Инструментальная сталь | 650–700 HB               | HR200                    |

## **5. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ В БИОТЕХНОЛОГИИ**

В начале нового тысячелетия биотехнологическая промышленность ищет возможности заменить материалы, используемые в настоящее время для технологического оборудования, и ускорить переход к передовым, улучшенным технологиям в этой области. На протяжении всего прошлого столетия материалы перерабатывающего оборудования, в основном нержавеющая сталь и стекло, характеризовались наличием проблем и ограничений, таких как шероховатость поверхности, точечная коррозия, загрязнение продуктов металлами, проблемы с отложениями окислов на поверхности оборудования, дорогостоящая и проблемная с экологической точки зрения очистка и дезинфекция оборудования, механические повреждения из-за перепадов температур, а также проблемы, связанные с образованием биопленок на поверхности оборудования. Беглый анализ показывает, что развитие все более усложняющегося биохимического производственного процесса ограничивается выбором материалов для изготовления оборудования.

При выборе материалов в биотехнологической промышленности и решении вопросов коррозионной защиты оборудования необходимо учесть следующие особенности отрасли:

1. Высокие требования к чистоте конечной продукции. Металлические примеси, вполне допустимые в конечных продуктах химической промышленности, совершенно недопустимы в лекарственных веществах и пищевых продуктах. Обладая высокой химической активностью, эти примеси способны вступать в различные реакции и образовывать продукты деструкции с высоким порогом токсичности, нанося огромный вред здоровью человека.

2. Широкая распространенность совмещенных схем производства, обусловленная сравнительно небольшим объемом выпуска большей части биотехнологических продуктов. Вследствие этого,

а также из-за сравнительно быстрого обновления номенклатуры конечных продуктов в биотехнологической промышленности широкое распространение получили схемы производства, позволяющие быстро переходить от получения одного продукта к выпуску другого на одной и той же аппаратурной схеме. При этом состав сред, используемых в синтезе, при очистке и выделении разных продуктов может существенно различаться.

3. Ограниченность способов коррозионной защиты. Для защиты технологического оборудования химических производств от коррозии применяют ингибирование, неметаллические покрытия, электрохимическую защиту, коррозионно-стойкие материалы и сплавы. Однако особенности биотехнологической отрасли не позволяют в полной мере использовать все перечисленные способы. Так, опасность внесения в реакционную массу химически активных соединений, способных влиять на направление синтеза, не позволяет применять в отрасли ингибирование, ограниченно используются неметаллические покрытия. Периодичность протекающих процессов, изменения реологических свойств реакционных сред не позволяют применять электрохимическую защиту. Поэтому основным способом защиты оборудования от коррозии в отрасли является выбор коррозионно-стойких материалов. Таким образом, к конструкционным материалам реакционного и вспомогательного оборудования биотехнологических производств должны предъявляться более жесткие требования, чем в химических производствах, и необходима разработка нового подхода к выбору коррозионно-стойких материалов для оборудования биотехнологических производств, позволяющего снизить коррозионные потери отрасли и повысить качество конечных продуктов.

Нержавеющая сталь исторически была принята для сдерживания химической коррозии, поскольку она наиболее устойчива к большому количеству химических веществ, чем железо или мягкая сталь. Этот материал представляет собой сплав на основе железа, хрома и никеля. Изделия из нержавеющей стали прочные и надежные, а их первоначальная стоимость хотя и выше, чем у железа или мягкой стали, но зачастую меньше, чем у других экзотических



металлургических материалов. В зависимости от количества второстепенных ингредиентов в металлургической формуле химическая стойкость нержавеющей стали к определенным химическим веществам может быть улучшена. Однако такая улучшенная химическая стойкость сопровождается соответствующим увеличением стоимости. Но даже такого улучшения химической стойкости недостаточно для защиты от агрессивных химических веществ или коррозионного действия компонентов биопленки.

Нержавеющие стали разрушаются со временем, когда незначительные ингредиенты из состава сплава теряются и возникают электрохимические потенциалы, которые способствуют окислению железа. Например, в сварных швах на нержавеющей стали железо становится более доступным для окисления даже в самых мягких условиях, т. е. в горячем паре, и образовавшаяся ржавчина («шелушение») загрязняет и ухудшает качество продуктов, производимых на таком оборудовании.

Нержавеющая сталь может быть дополнительно подвергнута химической обработке, чтобы быть менее реакционноспособной, т. е. пассивированной. В то же время это затратный и дорогостоящий способ защиты, который должен выполняться регулярно, чтобы гарантировать, что железо в этом материале не окисляется, т. е. не превращается в ржавчину. Пассивирование недолговечно и должно регулярно повторяться, если оборудование имеет множество сварных швов. Нержавеющая сталь, независимо от того, пассивированная она или нет, реагирует со многими агрессивными химическими веществами, особенно хлоридами и другими галогенидами, что ограничивает ее использование в биотехнологических производствах.

Поверхностные неровности нержавеющей стали от 180 до 400 мкм могут быть сглажены, хотя только с временным положительным эффектом, до микронного уровня, путем электрополирования. Но электрополирование также дорогостоящая процедура, которую необходимо часто повторять для поддержания высокого качества поверхности. Тем не менее электроразглаживание лишь уменьшает высоту неровностей на металлической поверхности, но не позволяет уда-

лить уголки и трещины, окружающие основание неровностей. Что еще хуже, электрополирование может удалить включения на металлической поверхности с образованием каверн, которые, в свою очередь, могут содержать микроорганизмы и компоненты биопленки. Эти маленькие углубления на поверхности позволяют полностью укрывать микроорганизмы даже от самой тщательной очистки оборудования. Физико-химические свойства нержавеющей стали являются еще одним значительным негативным фактором при ее использовании в биотехнологических отраслях промышленности: она хорошо смачивается водными растворами, что понижает не только устойчивость к химической коррозии, но также устойчивость к негативному влиянию биопленок на поверхность.

Анализ различных образцов биотехнологической продукции (см.: *Таранцева К. Р., Пахомов В. С.* Анализ коррозионных потерь в химико-фармацевтической промышленности // *Коррозия: материалы, защита*. 2008. № 5. С. 19–23) показал наличие в них большого количества металлических примесей, мкг/кг: железа < 75,0; хрома < 24,1; марганца < 20,1; никеля < 3,16; цинка < 36,5; меди < 8,8; свинца < 6,31. При этом примеси железа встречаются в 98 % лекарственных средств, хрома – в 87 %, никеля – в 84 %, цинка – в 82 %, марганца – в 79 %, меди – в 74 %, свинца – в 38 %. Очевидно, что основной причиной попадания металлических примесей в продукты биотехнологии является коррозия основного и вспомогательного оборудования в процессе производства. Этот вывод сделан из анализа качественного и количественного состава металлических примесей в лекарственных средствах.

С учетом того что в отрасли в основном применяется аппаратура, изготовленная из нержавеющей сталей, в ряде случаев из алюминиевых, титановых и медных сплавов, реже оцинкованная, освинцованная или футерованная, источник попадания примесей железа, хрома, марганца, никеля, меди, цинка и свинца в конечные продукты не вызывает сомнений. Между тем далеко не все признают этот факт и по-прежнему считают, что требования к конструкционным материалам в процессах биотехнологического синтеза во многих отношениях ниже, чем в химическом производстве.

Поэтому до сих пор в отрасли существует сугубо формальный подход к выбору конструкционных материалов для производств биотехнологии, заимствованный из опыта химической промышленности.

Анализ коррозионной защиты на предприятиях биотехнологической промышленности показывает, что она в основном осуществлялась путем подбора устойчивых материалов. При этом основным способом защиты от коррозии является использование коррозионно-стойких сталей и сплавов. Доля этого метода защиты на предприятиях биотехнологии составляет от 27 до 52 %. Кроме того, большой популярностью пользуется футеровка промышленного оборудования эмалями и пластмассами. Все эти методы позволяют сократить потери от коррозии, которые на крупных предприятиях отрасли, таких как Пензенский завод «Биосинтез», достигают огромных размеров. Обследование состояния оборудования производства антибиотиков на заводе «Биосинтез» показало, что оно подвергается чаще всего питтинговой коррозии, реже – щелевой и межкристаллитной. Срок службы технологического оборудования в производстве антибиотиков до выхода его из строя по причине коррозионных разрушений различный. Срок службы оборудования на этапах биологического синтеза, выделения, химической очистки и химической трансформации (емкостное, экстракционно-отстойное, дистилляционное и теплообменное) составляет для оборудования из нержавеющей стали от 5 до 10 лет, а для оборудования из обычной стали 2–3 года. При этом оборудование выводится из эксплуатации по причине локальной коррозии околосварных швов или неровностей поверхности.

Цветные металлы и сплавы в отрасли применяются ограниченно. Медь и медные сплавы используются в основном для теплообменной аппаратуры, реже для дражировочных котлов. Алюминий и его сплавы для конструктивного оформления процессов производства антибиотиков практически не применяются. Титан и его сплавы используются очень ограниченно, широкое применение их сдерживается дороговизной.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что основным материалом при изготовлении биотехнологического оборудования

до сих пор являются нержавеющие стали, при этом они подвергаются коррозионному разрушению, что приводит к загрязнению конечных продуктов примесями металлов.

Альтернативой оборудованию, изготовленному из нержавеющей стали, могло бы стать оборудование из термостойкого стекла. Этот аморфный неорганический материал легко формируется, превращаясь в компоненты конструкции и покрытия. Он химически устойчив к большинству органических химических веществ и ко многим, но не ко всем, неорганическим химическим веществам. Стекло и изделия из него, например стекловолокно, с успехом используются для получения различных композитных материалов. Стекло хорошо сочетается с металлами в эмалированных изделиях и металло-керамике. Биотехнологическая промышленность использует этот материал, учитывая его положительные и отрицательные стороны с точки зрения науки о материалах. К сожалению, стекло имеет недостаточно хорошие механические свойства: оно очень хрупкое, имеет низкую ударную прочность, плохо выдерживает тепловой цикл. Большая разница между коэффициентами линейного расширения стекла и стали ведет к тому, что стеклянные покрытия обнажают подстилающую стальную подложку для технологических жидкостей. В процессе эксплуатации из стекла выщелачиваются элементы, которые помогают улучшать его механические свойства. Все это сокращает срок службы эмалированного оборудования на предприятиях биотехнологии, в ряде случаев – до нескольких месяцев.

Выход из строя эмалированного оборудования объясняется не агрессивностью среды, а неблагоприятным температурным режимом эксплуатации. Срок службы такого оборудования ограничен из-за растрескивания и скола эмали при быстром нагревании, охлаждении и при механических воздействиях. Микротрещины, появившиеся на эмалевом покрытии, способствуют быстрому развитию коррозионных процессов и, как следствие, ухудшению качества антибиотиков. Следует также иметь в виду, что в биотехнологии любые трещины на поверхности являются идеальным местом для развития биопленок, которые приводят к дальнейшему разрушению оборудования.

Решением большинства проблем биотехнологической отрасли могло бы стать массовое внедрение стального оборудования, футерованного пластмассами. Особенно перспективным является использование фторполимеров, а также полиариамидов. Разработка данного подхода крайне необходима в связи с массовым перевооружением заводов отрасли и переходом на выпуск новых продуктов, характеризующихся все более жесткими условиями проведения синтеза, а следовательно, и более высокими требованиями к коррозионной стойкости оборудования.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Бирюков В. В.* Основы промышленной биотехнологии / В. В. Бирюков. – М. : Химия, 2004. – 296 с.

*Вихров С. П.* Биомедицинское материаловедение / С. П. Вихров. – М. : ГЛТ, 2006. – 494 с.

*Игнатович Э.* Химическая техника. Процессы и аппараты / Э. Игнатович. – М. : Техносфера, 2007. – 656 с.

*Колесов Н. С.* материаловедение и технология конструкционных материалов / Н. С. Колесов, И. С. Колесов. – М. : Высш. шк., 2008. – 535 с.

*Лахтин Ю. М.* материаловедение : учеб. / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Изд-во Альянс, 2013. – 528 с.

Материаловедение : учеб. / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. – 5-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 646 с.

*Поздняков В. А.* Физическое материаловедение наноструктурных материалов / В. А. Поздняков. – М. : МГИУ, 2007. – 424 с.

*Поникарпов И. И.* Расчеты машин и аппаратов химических производств и биотехнологии / И. И. Поникарпов, С. И. Поникарпов, С. В. Рачковский. – М. : Альфа-М, 2011. – 718 с.

*Солнцев Ю. П.* материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб. : Химиздат, 2004. – 426 с.

*Солнцев Ю. П.* Оборудование пищевых производств. материаловедение / Ю. П. Солнцев и др. – СПб. : Профессия, 2003. – 500 с.

Учебное издание

Миронов Максим Анатольевич

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В БИОТЕХНОЛОГИИ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Учебно-методическое пособие

Заведующий редакцией *М. А. Овечкина*  
Редактор *Т. А. Федорова*  
Корректор *Т. А. Федорова*  
Компьютерная верстка *Г. Б. Головина*

Подписано в печать 14.09.18. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Цифровая печать.

Уч.-изд. л. 4,0. Усл. печ. л. 5,1. Тираж 50 экз. Заказ 196.

Издательство Уральского университета.

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ

620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Тел.: +7 (343) 389-94-79, 350-43-28

E-mail: [rio.marina.ovechkina@mail.ru](mailto:rio.marina.ovechkina@mail.ru)

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ

620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13

Факс +7 (343) 358-93-06

<http://print.urfu.ru>

ДЛЯ ЗАМЕТОК



ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК



